

Luís da Ilda Machava

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO VENTO PARA IMPLEMENTAÇÃO DE  
TECNOLOGIAS EÓLICAS NA COSTA DE VILANKULO**

Licenciatura em Ensino de Física com Habilitações em Matemática

Universidade Pedagógica

Gaza

2015

Luís da Ilda Machava

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO VENTO PARA IMPLEMENTAÇÃO DE  
TECNOLOGIAS EÓLICAS NA COSTA DE VILANKULO**

Monografia Científica apresentada ao Departamento de Física, FCNM Delegação de Gaza para a obtenção do grau de Licenciatura em Ensino de Física com Habilitações em Matemática.

Supervisor:

---

(MSc. André Silvestre Cuinica)

Universidade Pedagógica

Gaza

2015

## ÍNDICE

Lista de Tabelas .....	v
Lista de Figuras.....	vi
Lista de Abreviaturas .....	vii
Declaração .....	ix
Dedicatória .....	x
Agradecimentos .....	xi
Resumo.....	xii
<b>CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Contextualização .....	1
1.2 Delimitação do Tema.....	3
1.3 Problematização .....	3
1.4 Objectivos .....	4
1.4.1 Objectivo Geral .....	4
1.4.2 Objectivos Específicos.....	4
1.5 Hipóteses.....	4
1.6 Justificativa .....	5
<b>CAPÍTULO II: REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>6</b>
2.1 O Conceito do Vento .....	6
2.1.1 Ventos Globais .....	6
2.1.2 Ventos Locais .....	7
2.2 Efeitos da Topografia sobre o Vento.....	8
2.2.1 Obstáculos .....	9
2.2.2 Cisalhamento e Extrapolação da Velocidade do Vento.....	9
2.2.3 Turbulência.....	10
2.3 Medição do Vento .....	11
2.4 Noções Básicas de Conversão da Energia Eólica .....	12
2.4.1 Potência Disponível no Vento .....	12

2.4.2	Coeficiente de Potência.....	13
2.5	Tecnologias de Aproveitamento da Energia Eólica .....	13
2.5.1	Nota Histórica.....	13
2.5.2	Moinho de Vento para Bombagem de Água.....	15
2.5.3	Turbinas Eólicas Actuais e Princípio Básico de Funcionamento.....	16
2.5.4	Curva de Potência de Turbina Eólica de Pequeno Porte.....	18
2.6	Estudos dos Regimes de Vento em Moçambique .....	19
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGIA .....</b>		<b>21</b>
3.1	Descrição da Área do Estudo.....	21
3.2	Colecta e Validação dos Dados.....	22
3.3	Distribuição da Direcção do Vento .....	23
3.4	Tratamento Estatístico da Velocidade do Vento.....	24
3.4.1	Média e Desvio-Padrão.....	24
3.4.2	Distribuição de Weibull .....	24
3.5	Densidade da Potência do Vento.....	26
3.6	Estimativa da Energia Disponível Baseado na Distribuição de Weibull.....	27
3.7	Extrapolação da Velocidade do Vento .....	27
3.8	Potência e Vazão da Água do Moinho do Vento .....	28
<b>CAPÍTULO IV: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>		<b>29</b>
4.1	Estatística dos Dados do Vento.....	29
4.2	Varição Mensal da Velocidade do Vento .....	29
4.3	Distribuição das Frequências da Direcção do Vento.....	30
4.4	Varição Horária da Velocidade do Vento .....	32
4.5	Varição $\delta$ Diurnal $\delta$ da Direcção do Vento.....	33
4.6	Distribuição Weibull de Probabilidades das Velocidades do Vento.....	34
4.7	Varição Vertical da Velocidade do Vento .....	36
4.8	Estimativa da Densidade de Potência Energética e Hidráulica, Energia e Vazão .....	36
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>		<b>38</b>

5.1	Conclusões .....	38
5.2	Sugestões .....	39
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>40</b>
<b>APÊNDICES .....</b>		<b>43</b>
Apêndice A:	Distribuição dos obstáculos em torno do ponto de medição dos dados .....	43
Apêndice B:	Distribuição das frequências da direção do vento ao longo do dia .....	43
<b>ANEXO .....</b>		<b>44</b>
Anexo A:	Especificações técnicas da turbina Evance R9000.....	44

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2. 1:	Comprimento característico de rugosidade do solo .....	10
Tabela 3. 1:	Especificações dos instrumentos de medição usados em Vilankulo .....	22
Tabela 3. 2:	Critério de teste de gama .....	23
Tabela 3. 3:	Classes da densidade da potência do vento .....	26
Tabela 3. 4:	Valores da função gama em função do argumento $x$ .....	27
Tabela 4. 1:	Apuramento dos dados do vento medidos na estação de Vilankulo .....	29
Tabela 4. 2:	Densidade de potência energética, potência hidráulica, energia e vazão estimadas na costa de Vilankulo a 10m de altura .....	37
Tabela A. 1:	Dados operacionais da Evance R9000 .....	44

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1:	Esquema da circulação geral da atmosfera .....	7
Figura 2. 2:	Brisas: a) marítima e b) terrestre .....	8
Figura 2. 3:	Acção do vento perante um obstáculo .....	9
Figura 2. 4:	Instrumentos de medição do vento: a) Anemómetro de três conchas e b) Cata- vento de palheta .....	11
Figura 2. 5:	Evolução das tecnologias eólicas .....	14
Figura 2. 6:	Moinho de vento .....	16
Figura 2. 7:	Turbinas eólicas de eixo de rotação vertical .....	17
Figura 2. 8:	TERH a) pequeno porte; b) médio porte e c) grande porte .....	17
Figura 2. 9:	Componentes básicos de turbinas eólicas de pequeno porte .....	18
Figura 2. 10:	Curva de potência de Evance R9000 .....	19
Figura 3. 1:	Topografia de Vilankulo .....	21
Figura 3. 2:	Rosa-dos-ventos dividido em 16 sectores com os respectivos ângulos horários e nomes.....	24
Figura 4. 1:	Variação mensal da velocidade do vento na costa de Vilankulo a 10m de altura..	30
Figura 4. 2:	Distribuição das frequências da direcção do vento.....	31
Figura 4. 3:	Rosas-dos-ventos da variação mensal da direcção do vento .....	32
Figura 4. 4:	Comportamento horário da velocidade do vento a 10m de altura .....	33
Figura 4. 5:	Rosas-dos-ventos representativos da direcção do vento ao longo do dia.....	34
Figura 4. 6:	Distribuição Weibull de probabilidades das velocidades do vento.....	35
Figura 4. 7:	Variação vertical da velocidade do vento.....	36
Figura A. 1:	Distribuição dos obstáculos em torno do ponto de medição dos dados.....	43
Figura A. 2:	Rosas-dos-ventos da distribuição diurna das frequências da direcção do vento em Vilankulo .....	43

**LISTA DE ABREVIATURAS**

<b>Abreviatura</b>	<b>Designação</b>
Abr/Apr	Abril
Ago/Aug	Agosto
Dez/Dec	Dezembro
E	Este
ENE	És-nordeste
ESSE	És-sudeste
FCNM	Faculdade de Ciências Naturais e Matemática
Fev/Feb	Fevereiro
INAM	Instituto Nacional de Meteorologia
Jan	Janeiro
Jul	Julho
Jun	Junho
Mai/May	Mai
Mar	Março
MSES	Meteorologia de Superfície e Energia Solar
MVBA	Moinho de Vento para Bombagem de Água
N	Norte
NE	Nordeste
NNE	Nor-nordeste
NNO	Nor-noroeste
NO	Noroeste
Nov	Novembro
O	Oeste
ONO	Oés-noroeste
OSO	Oés-sudoeste
Out/Oct	Outubro
S	Sul
SE	Sudeste
Set/Sep	Setembro



SO	Sudoeste
SSE	Su-sudeste
SSO	Su-sudoeste
TEPP	Turbinas Eólicas de Pequeno Porte
TERH	Turbinas de Eixo de Rotação Horizontal
TERV	Turbinas de Eixo de Rotação Vertical
VMA	Velocidade Média Anual
VMM	Velocidade Média Mensal

## DECLARAÇÃO

Eu, *Luís da Ilda Machava*, declaro que esta Monografia Científica é resultado da minha investigação pessoal e das orientações do meu supervisor, o seu conteúdo é original e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionadas no texto, nas notas e na bibliografia final.

Declaro ainda que este trabalho não foi apresentado em nenhuma outra instituição para a obtenção de qualquer grau académico.

Xai-Xai, Maio de 2015

O autor:

---

Luís da Ilda Machava

## DEDICATÓRIA

*Este trabalho é dedicado a*

*minha mãe, Ilda S. Machava (em memória),*

*minha tia Verónica S. Machava*

*e a minha família*

*pelo apoio prestado durante o meu percurso estudantil,*

*pois acreditaram que o desenvolvimento do novo homem está assente na educação.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela vida, saúde e bênçãos que me proporciona.

Um muito obrigado vai ao supervisor MSc. André Silvestre Cuinica, pela sábia forma que teve na orientação deste trabalho e durante a percorrida dos quatro anos da minha formação. Agradeço ainda ao Sr. Viriato Macaringue, Delegado do Instituto Nacional de Meteorologia (INAM) - Inhambane, pela atenção e ajuda prestada no processo de aquisição dos dados de vento.

Agradeço igualmente ao INAM por ter me fornecido os dados do vento da estação meteorológica de Vilankulo, os quais foram fundamentais para este trabalho.

Os meus agradecimentos são extensivos aos meus primos, amigos e colegas pela troca de conhecimento e confiança. À todos os que acreditam nas energias renováveis, àqueles que lutam pela melhoria da qualidade de ensino em Moçambique e àqueles que directa ou indirectamente tornaram este sonho numa realidade, vai o meu profundo sentimento de gratidão.

## RESUMO

O presente trabalho aborda sobre o potencial do vento em Vilankulo, visando analisar as principais características deste recurso junto à costa. Para tal, foram recolhidos os dados horários de velocidade e direcção do vento, medidos entre as 5:00 e 21:00, a uma altura de 10m na estação meteorológica de Vilankulo, compreendendo a um período de três anos (Setembro-2011 a Agosto-2014). O tratamento e análise destes dados basearam-se fundamentalmente na aplicação do modelo estatístico Weibull e do software Windographer. Os resultados indicam que a zona costeira de Vilankulo possui uma velocidade média de 4,60m/s, variando de 3,53m/s em Maio a 5,81m/s em Outubro. A direcção predominante varia de Este (E-12,94%) a Sul (S-10,89%). Ao longo do ano, as velocidades máximas ocorrem no período das 14:00 às 16:00, variando de 4,80 a 7,03m/s e as mínimas observadas ocorreram as 5:00 horas, variando de 1,88 a 4,07m/s. A direcção do vento predomina do Sudoeste (SO) das 5:00 às 12:00 horas, Sudeste (SE) das 12:00 às 18:00 horas e variando de E a S, das 18:00 às 22:00 horas. Cerca de 83% do tempo (anual) o vento sopra com velocidade superior a 2,5m/s e, em 76%, acima de 3,0m/s. A densidade de potência energética anual estima-se em 194W/m<sup>2</sup>, a potência hidráulica em 83W e a vazão em 1209 l/h. Assim, a costa de Vilankulo enquadra-se na terceira classe da potência energética, recomendável para a implementação de turbinas eólicas de pequeno porte para a geração de electricidade e para implementação de moinhos de vento para a bombagem de água.

**Palavras-chave:** Velocidade do vento, Direcção do vento, Potência, Energia, Vilankulo.

## CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

As fontes de energia renovável, cuja origem é principalmente derivada do enorme potencial da radiação solar, possuem a extraordinária particularidade de serem, simultaneamente, as fontes energéticas mais antigas e mais modernas usadas pela humanidade. Constituem a essas fontes, para além da energia solar, na sua forma directa, a energia eólica, hídrica, marés, ondas e geotérmica. Algumas destas fontes foram usadas desde a cerca de 2800 anos a.C. (Marques, 2004) pelos egípcios e aperfeiçoadas a medida que a evolução das diversas máquinas exigia novas demandas energéticas a cada ano que passava.

Apesar da remota utilização das fontes de energia renovável, a demanda energética mundial foi sempre largamente satisfeita por combustíveis fósseis. Estima-se que, por exemplo, em 1973 a demanda energética mundial estava na ordem de 6.115TWh, satisfeita em 38,3% por carvão mineral, 24,7% por petróleo, 21,0% por hídrica, 12,1% por gás natural, 3,3% por energia nuclear e 0,6% por outras fontes (IEA, 2007). Em 2009, esta demanda cresceu para 20.055TWh e era satisfeita por carvão 40,5%, gás natural 21,4%, hídrica 16,2%, nuclear 13,4%, petróleo 5,1% e as restantes fontes, incluindo a energia eólica, em 3,3% (*Ibidem*). Em 2012, três quartos da energia consumida no mundo provinha de combustíveis fósseis (Castro, 2012).

Em África, os combustíveis fósseis no ano de 1973, por exemplo, satisfizeram a demanda energética em 73,0%, do total de 113TWh, com maior participação do carvão mineral em 58,7% e as energias renováveis tinham uma contribuição abaixo de 0,1%. Em 2009, a demanda energética continental evoluiu para cerca de 630TWh, sendo maioritariamente satisfeita pelo trio de combustíveis fósseis em 81,8% (*Ibidem*).

Em Moçambique, tal como na maioria dos países africanos e em parte, do mundo, os combustíveis fósseis massificam-se na supressão da demanda energética. Por exemplo, em 1979 o carvão, o gás natural e o petróleo contribuíram em 58,5% e a hídrica em 41,5% do total de 0,6TWh da demanda de energia eléctrica anual. Esta demanda aumentou para 17TWh em 2012 tendo sido suprida em 62,7% por combustíveis fósseis e em 37,3% por hídrica (Castro, 2012).

Ora, a massificação do uso de combustíveis fósseis esteve e está associada às mudanças climáticas devido a libertação de gases de efeito de estufa, a proliferação de diversas doenças como pulmonares (asma, bronquite, entre outras) pelo fumo libertado no âmbito de confecção de alimentos. Por outro lado, tem a ver com o facto de os combustíveis fósseis serem localizáveis e (as suas reservas) esgotáveis. Isto proporciona a crise de preços de sua aquisição no mercado mundial e, conseqüentemente, um impacto económico mundial negativo.

É de notar que qualquer país que esteja no ritmo de desenvolvimento precisa de energia como um ingrediente preponderante para o seu garante. Todavia, esta energia deve ser ambientalmente benigna. Moçambique é um país em via de desenvolvimento, que conta apenas com cerca de 15 a 20% do total de 23 milhões da sua população com acesso a electricidade, dos quais apenas cerca de 3 a 5% corresponde à população das zonas rurais (Mahumane *et al.*, 2012). Mais de 80% da população ainda recorre a biomassa para satisfazer as suas necessidades energéticas. Este recurso energético é largamente usado de forma ineficiente, isto é, no tradicional òfogaõ de três pedrasõ, incorrendo desta forma, sobretudo as mulheres e crianças que estão directamente ligadas a cozinha, a vários riscos de saúde.

Dado à favorável localização geográfica, o país apresenta um espectro energético renovável elevado, recursos estes que, se devidamente avaliados, a sua exploração pode suprir a demanda energética, impulsionando deste modo o desenvolvimento das comunidades. Aliás, a energia eólica é uma das fontes renováveis que, mundialmente, já se demonstrou que pode ser explorada para suprir a demanda energética de forma ambientalmente amiga para um desenvolvimento sustentável. Só até 2009 o mundo contava com 273.153GWh de capacidade instalada e, segundo MME (2012), em alguns países africanos como Egipto e Marrocos, os dois juntos totalizando 87,09% de 1.681GWh de toda energia eólica produzida no continente, este recurso já contribuía como resposta à necessidade energética.

Neste contexto, propõs-se a presente pesquisa levado a cabo na zona costeira de Vilankulo, sul de Moçambique, que visa trazer á tona uma ideia geral sobre o potencial da energia eólica naquela zona. Esta é uma medida primordial que deve ser sempre tomada para a instalação de tecnologias de aproveitamento de energia para a supressão da demanda energética em qualquer lugar.

## 1.2 Delimitação do Tema

Esta pesquisa está mais focalizada no comportamento do vento. No que respeita ao vento serão abordados o comportamento da velocidade do vento, a direcção do vento e o potencial energético e hidráulico disponíveis pelo vento numa escala mensal e anual. Fazer-se-á também uma estimativa da energia e a vazão que se pode produzir a partir do vento. Não serão abordados neste estudo aspectos relacionados com os procedimentos de montagem de uma turbina eólica e/ou de moinho de vento para bombagem de água nem com a eficiência destes dispositivos.

## 1.3 Problematização

Tomando em conta que em Moçambique, o acesso a energia eléctrica é de apenas 20% e deste apenas cerca de 3 a 5% corresponde à população das zonas rurais, este mostra-se ser um dos países com os níveis mais baixos de consumo de energia eléctrica de África subsaariana, com cerca de 80% do consumo energético do país baseado em biomassa tradicional (Mahumane, *et al.*, 2012).

O intensivo uso da biomassa tradicional provoca a formação de grandes áreas desmatadas extinguindo certas espécies, emissão de gases poluentes e instauração de doenças respiratórias nos utentes. Entretanto, Moçambique possui um espectro de energias renováveis elevado, recurso que se devidamente avaliado e explorado pode atender as necessidades energéticas com baixíssimos níveis de efeitos indesejáveis. De entre várias formas de energias renováveis disponíveis há que ressaltar a energia eólica por ser esta uma das energias renováveis em destaque no panorama internacional.

A utilização da energia eólica, para além de ser inesgotável, não emite gases poluentes nem gera resíduos e pode suprir a demanda energética. No entanto, para sua utilização segura e viável é preciso que se conheça o comportamento do vento no local em causa e que se conheça previamente a capacidade de produção das futuras instalações daí que advém a seguinte questão:

*Até que nível o comportamento do vento favorece a implementação de tecnologias eólicas para a geração de energia eléctrica e/ou bombagem de água em Vilankulo?*



## 1.4 Objectivos

### 1.4.1 Objectivo Geral

O principal objectivo desta pesquisa é estudar o potencial de energia eólica na zona costeira de Vilankulo para fins de geração de energia eléctrica e/ou bombagem de água, baseando-se em dados que compreendem o período de Setembro de 2011 a Agosto de 2014.

### 1.4.2 Objectivos Específicos

Para tornar realizável o objectivo geral, os objectivos específicos encontram-se definidos da seguinte maneira:

- a) Caracterizar a variação horária, *odiurnalö*, mensal, sazonal e anual da velocidade do vento e da direcção do vento;
- b) Verificar a distribuição da frequência da velocidade do vento, potência energética e hidráulica disponíveis, a energia anual produzida e a vazão anual estimada; e
- c) Extrapolar a velocidade do vento para diferentes alturas.

## 1.5 Hipóteses

A localização do distrito de Vilankulo permite-nos esperar o seguinte:

- a) A variação das componentes do vento pode ser constante ao longo do dia e durante as estações do ano;
- b) A distribuição da frequência da velocidade do vento pode ser aceitável para que a consequente potência energética disponível corresponda a exigência da mínima requerida pelas turbinas eólicas e/ou para bombagem da água; e
- c) A extrapolação da velocidade média do vento pode identificar alturas de boa disponibilidade do recurso eólico para a geração da energia eléctrica e/ou bombagem de água em Vilankulo.

## 1.6 Justificativa

Mundialmente, o petróleo, o gás natural e o carvão mineral são os combustíveis que respondem maioritariamente a demanda energética o que ocasiona a emissão de altos índices de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e de outros gases causadores do efeito estufa.

As comunidades moçambicanas, devido ao fraco acesso a energia eléctrica, encontram na lenha e carvão vegetal a forma alternativa para a satisfação das suas necessidades energéticas e como consequência surge o desflorestamento e a provocação de doenças respiratórias nos utentes.

Acredita-se que a potencialização do uso de energia eólica diminuirá a emissão dos gases de efeito estufa e simultaneamente evitando doenças provocáveis pelo uso da lenha e o carvão. No entanto, não é em qualquer lugar que se pode implementar tecnologias eólicas com vista à produção de energia eléctrica e/ou bombagem de água, pois nem todos os locais apresentam características do vento favoráveis à instalação de tecnologias eólicas em condições de rentabilidade económica.

Para que se tome a decisão de implementar tecnologias eólicas é preciso que haja pesquisas e estudos que possam identificar uma eventual área com potencial eólico para a implementação de tecnologias eólicas. É neste sentido que se torna pertinente o estudo do comportamento de vento para a implementação de tecnologias eólicas em Vilankulo.

## CAPÍTULO II: REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 O Conceito do Vento

A fonte primária de todas as formas de energia presentes na natureza é o Sol. O Sol emite radiações electromagnéticas em todas as direcções no espaço. O termo radiação, ou energia radiante, refere à energia que se propaga sem necessidade da presença de um meio material (Silva, 2005: p.194). A radiação solar que intercepta o topo da atmosfera terrestre é de  $1.367,5\text{W/m}^2$ , cerca de 36% desta é reflectida directamente para o espaço. A radiação que atinge a superfície terrestre é atenuada por processos de difracção, refracção, absorção e reflexão por meio de nuvens e partículas suspensas na atmosfera terrestre.

Atmosfera é a camada gasosa que envolve a Terra acompanhando-a em todos os seus movimentos (Nakata & Coelho, 1985). É nela que se serve de palco de todos os fenómenos meteorológicos. Os gases que a constituem formam uma mistura transparente, incolor e inodora conhecida como ar atmosférico. O movimento deste ar atmosférico é conhecido por vento.

De acordo com Silva (2005, p.302) o vento é a componente horizontal da velocidade do ar. Todavia, Ricardo (2004, p.103) é mais simplista definindo o vento como sendo o ar em movimento devido a ajustes atmosféricos causados pela diferença de pressão. As diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre são devidas ao facto de, em primeiro lugar, a radiação solar recebida na Terra ser maior nas zonas do equador do que nas proximidades dos pólos e, em segundo lugar, ao movimento de rotação da Terra e variações sazonais de distribuição de energia solar incidente. Estes dois factores são os causadores dos chamados ventos globais.

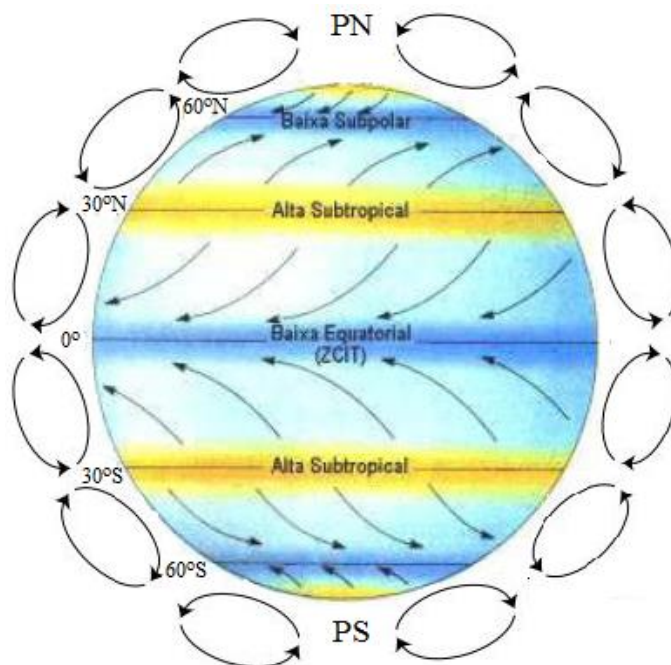
#### 2.1.1 Ventos Globais

Já dissemos que o aquecimento e a rotação da Terra provocam a circulação global. Próximo do equador, devido ao aquecimento, criam-se zonas de baixas pressões, o que faz com que haja convergência de ventos provenientes dos cinturões subtropicais de alta pressão localizados em torno de latitudes  $30^{\circ}\text{S}$  e  $30^{\circ}\text{N}$ , desviados para o Oeste devido à força de Coriolis<sup>1</sup> (Silva, 2005).

---

<sup>1</sup> Força inercial, fictícia, que surge devido a rotação da Terra.

Nessas latitudes encontram-se as zonas subtropicais de altas pressões que contribuem à movimentação do ar para o equador e para os pólos. A movimentação desde esta zona até os pólos é invertida a partir das latitudes de 60°S e 60°N na qual se encontram as zonas polares de baixas pressões (García, 2004: p.49). Estes comportamentos são esquematizados na Figura 2.1.



**Figura 2. 1:** Esquema da circulação geral da atmosfera (Fonte: Recriada Segundo Proclira, 2007)

Como consequência dos ventos globais, à latitudes compreendidas entre 90 e 60°S predominam os ventos de SE, de 60 a 30°S os de NO, de 30°S a 0° os alísios de SE, de 0° a 30°N os alísios de NE, de 30 a 60°N os de SO e de 60 a 90°N os de NE.

### 2.1.2 Ventos Locais

Apesar da importância dos ventos globais na determinação dos ventos dominantes numa determinada área, as condições climáticas locais podem influenciar na direcção do vento. Santos *et al.* (2006) afirma que quando os ventos globais são suaves, os ventos locais podem dominar o comportamento do vento. A direcção do vento é influenciada pela soma dos efeitos globais e locais podendo causar ventos periódicos. Estes últimos constituem ao movimento do ar que muda de direcção e sentido com uma certa periodicidade (García, 2004) como é o caso das brisas e ventos de montanha e vale.

As brisas marítimas são ventos periódicos que ao longo do dia, geralmente sopram do mar para o continente como resultado do aquecimento desigual entre as duas zonas (Mendes e Gomes, 2007). Durante o dia, a terra firme aquece-se mais rápido em relação a parte líquida do mar, tornando o ar sobre aquela, menos denso e, portanto ascende. Na ascensão, o ar vai se movendo para as zonas de baixas pressões (sob o mar) enquanto isso, nas altitudes mais baixas, o ar na superfície terrestre é substituído pelo ar relativamente frio do mar constituindo assim as brisas marítimas (Figura 2.2a).

Quando o sol se põe, o continente arrefece-se rapidamente fazendo com que a pressão da superfície terrestre baixe, portanto, o sentido do movimento do ar reverte-se tal como está indicado na Figura 2.2b), formando assim as brisas terrestres.



**Figura 2. 2:** Brisas: a) marítima e b) terrestre (Fonte: Mendes e Gomes, 2007)

No panorama dos ventos locais, existem também os chamados ventos de montanha ou vale. Estes ventos são observados nas regiões montanhosas e são originados pelo facto de no começo do dia, o aquecimento do ar do fundo do vale, que está mais denso, fazer com que o ar comece a fluir ao longo das declives sob a forma de ventos de vales. À noite, o processo inverte-se e o ar frio e denso começa a se acumular no fundo dos vales formando assim os ventos de montanha.

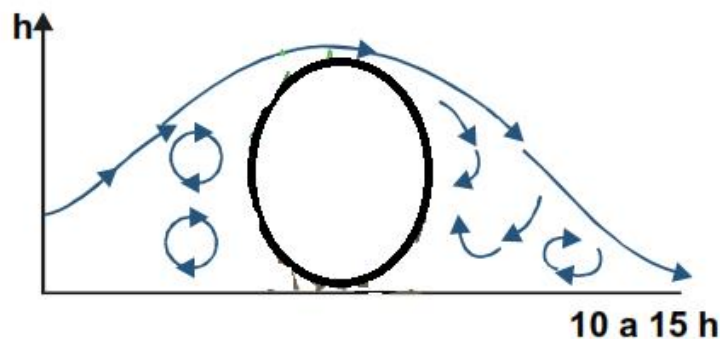
## 2.2 Efeitos da Topografia sobre o Vento

O vento é um escoamento do ar com características especiais. Estas características têm de ser devidamente contabilizadas quando se pretende instalar um aproveitamento de energia eólica. No

que diz respeito aos efeitos topográficos, existem três elementos principais a serem considerados, tal como se descreve a seguir.

### 2.2.1 Obstáculos

Os obstáculos (edifícios, árvores, formações rochosas, etc.) têm uma influência significativa na diminuição da velocidade do vento e são fontes de turbulência na sua vizinhança. A Figura 2.3 mostra o modo como o escoamento é afectado na área envolvente do obstáculo, podendo verificar-se que a zona turbulenta pode estender-se até cerca de 10 a 15 vezes a altura do obstáculo (Silva, 2005: 328). A turbulência é mais intensa na parte de trás do que na parte da frente do obstáculo.



**Figura 2.3:** Acção do vento perante um obstáculo (Fonte: Recriada de Silva, 2005)

A redução na velocidade do vento depende das dimensões e da porosidade do obstáculo. A porosidade pode ser definida através da equação (2.1) (*Ibidem*):

$$p = 1 - \frac{A_T}{A_{ef}} \quad (2.1)$$

onde,  $A_T$  é a área total ocupada pelo objecto e  $A_{ef}$  é a área efectiva.

### 2.2.2 Cisalhamento e Extrapolação da Velocidade do Vento

A velocidade do vento nas camadas superficiais é afectada pela rugosidade que varia com o tipo do terreno do local onde escoa o ar. Segundo Castro (2012), a variação da velocidade devido a esse factor é dada pela lei logarítmica seguinte (Equação 2.2):

$$v_m(z) = v_m(z_R) \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_R}{z_0}\right)} \quad (2.2)$$

onde  $v_m(z)$  é a velocidade média a altura desejada;  $v_m(z_R)$  é a velocidade média à altura de referência  $z_R$ ;  $z$  é a altura desejada e;  $z_0$  é comprimento de rugosidade. A Tabela 2.1 mostra os valores típicos do comprimento característico de rugosidade do solo ( $z_0$ ).

**Tabela 2. 1:** Comprimento característico de rugosidade do solo (Fonte: Santos, 2006)

Classe de Rugosidade	$z_0$ [m]	Tipo de paisagem
0	0,0002	Superfície do mar
0,5	0,0024	Superfície completamente livre com cobertura suave, como pista de aeroportos.
1	0,03	Áreas agrícolas abertas com edificações muito dispersas
1,5	0,055	Áreas agrícolas com edificações e quebra ventos de 8 metros de altura com uma distância aproximada de 1250m.
2	0,1	Áreas agrícolas com algumas construções e quebra ventos de 8 metros de altura com distância aproximada de 500m.
2,5	0,2	Áreas agrícolas com algumas edificações e quebra ventos de 8 metros de altura com uma distância aproximada de 250m.
3	0,4	Povoados, pequenas cidades e terreno muito desigual
3,5	0,8	Grandes cidades com edifícios altos.
4	1,6	Metrópoles com edifícios altos e arranha-céus.

### 2.2.3 Turbulência

Segundo Castro (2012), a turbulência é a componente flutuante do vento em torno da média. A turbulência não é uma característica do fluido em si mas sim, está associada ao escoamento do ar e é completamente irregular por essa razão, para sua descrição usa-se técnicas estatísticas. A intensidade de turbulência é dada pela equação (2.3):

$$I_v = \frac{\sigma_v}{v_m} \quad (2.3)$$

onde  $I_v$  é a intensidade da turbulência,  $\sigma_v$  é o desvio-padrão e  $v_m$  é a velocidade média. Os valores altos de intensidade de turbulência criam uma sobrecarga nas turbinas, dificultando a sua

produção normal de electricidade. Valores mais baixos, e consequentemente os necessários, são alcançados nas alturas elevadas.

### 2.3 Medição do Vento

A medição do vento é feita com instrumentos específicos, nomeadamente: anemómetro e cata-vento. O anemómetro mede o módulo da velocidade do vento, expresso em metros por segundo (m/s). Existem vários tipos de anemómetros nomeadamente: anemómetro de hélices, detenção da variação do som, anemómetro de fio quente e laser, anemómetro Doppler e anemómetro de copos ou conchas. Para a avaliação do recurso eólico, o tipo mais apropriado e usado para medir a velocidade horizontal do vento é o anemómetro de três conchas (Figura 2.4a), pois é bem adequado para a definição deste parâmetro e tende a ser de custo atraente em comparação com os outros tipos de anemómetros.



**Figura 2. 4:** Instrumentos de medição do vento: a) Anemómetro de três conchas e b) Cata-vento de palheta. (Fonte: Rújula, 2012)

Em conformidade com Rújula (2012) o anemómetro de conchas possui um eixo vertical de rotação e utiliza três ou quatro conchas para capturar o vento em que uma concha está sempre virada para a direcção de onde o vento sopra. A configuração das conchas converte a pressão da força do vento em rotação binária. A rotação das conchas é linearmente proporcional à



velocidade do vento. Um transformador acoplado ao anemómetro converte este movimento de rotação em sinal eléctrico, o qual é enviado através de um fio para o data-logger. Então, este converte o sinal eléctrico em valores reais da velocidade do vento.

O cata-vento (Figura 2.4 b) é o instrumento de medição da direcção do vento. A direcção do vento exprime a posição do horizonte aparente do observador a partir da qual o vento parece provir (Silva, 2005: p.296). A direcção é expressa em termos do azimute, i.e., do ângulo que o vector velocidade do vento forma com o norte geográfico local ( $0^\circ$ ), medido no sentido horário. Assim, o vento que vem de Este tem direcção de  $90^\circ$  e o que vem de Sul tem direcção de  $180^\circ$ .

O cata-vento é constituído por uma válvula que é formada por um elemento móvel que pode girar livremente em direcção da proveniência do vento, e um transformador que transforma a direcção da válvula para um sinal eléctrico. Normalmente este transformador é simplesmente um potenciómetro que quando fornecido uma fonte de tensão fixa, proporciona uma tensão de saída proporcional à posição da palheta (Rújula, 2012).

## 2.4 Noções Básicas de Conversão da Energia Eólica

### 2.4.1 Potência Disponível no Vento

Uma condição necessária para a utilização da energia contida no vento é a existência de um fluxo permanente e razoavelmente forte de vento. Actualmente, as turbinas são construídas para atingirem a potência máxima para velocidades do vento da ordem de 13 a 16 m/s (Castro, 2012).

A energia contida no vento é a energia cinética do ar em movimento e pode ser dada pela equação (2.4) (*Ibidem*):

$$E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(\rho Ax)v^2 \quad (2.4)$$

Portanto, a potência disponível no vento pode ser expressa pela equação (2.5) (Castro, 2012):

$$P_{disp} = \frac{dE_{cin}}{dt} = \frac{1}{2} \left( \rho A \frac{dx}{dt} \right) v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.5)$$

onde  $\rho$ ,  $A$  e  $v$  são, respectivamente, a densidade do ar, a área da pá e a velocidade do vento. Em condições atmosféricas normais, a densidade do ar não varia significativamente, de modo que a potência disponível do vento é essencialmente proporcional ao cubo da sua velocidade.

#### 2.4.2 Coeficiente de Potência

A potência que tratamos na secção anterior é a potência de incidência, esta potência não pode ser integralmente convertida em potência mecânica pela turbina, uma vez que o ar depois de atravessar o plano das pás, tem de sair com velocidade não nula. Existe uma taxa máxima de aproveitamento da potência da incidência chamada coeficiente de potência ( $C_p$ ) ou limite de Betz que é de 59,3% (Castro, 2012). Assim, a potência aproveitável pelas máquinas eólicas será determinada pela Equação (2.6):

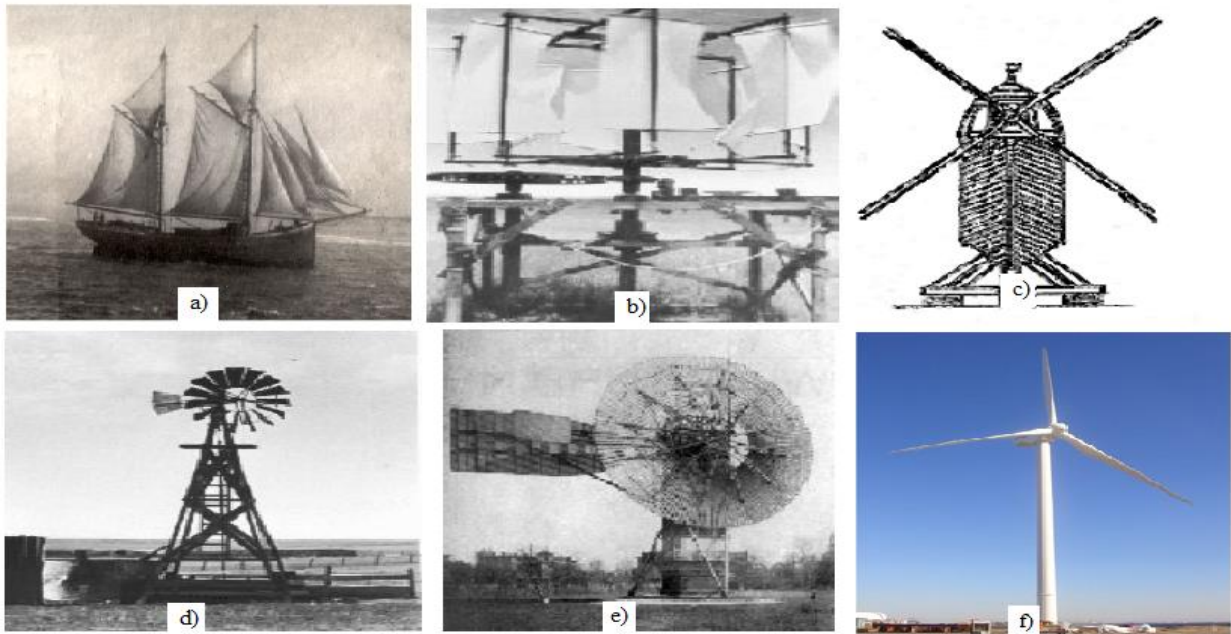
$$P_e = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (2.6)$$

### 2.5 Tecnologias de Aproveitamento da Energia Eólica

#### 2.5.1 Nota Histórica

A Figura 2.5a) mostra o primeiro uso da energia eólica de que se tem registo que é a utilização da força do vento nos barcos à vela. Esta tecnologia teve um importante impacto, posteriormente, no desenvolvimento dos moinhos de vento do tipo vela com eixo vertical na Mesopotâmia para bombagem de água por volta de 1700 a.C. (Marques, 2004). Esses moinhos possuíam eixo de rotação vertical e as pás, inspiradas nos barcos a vela, eram de tecido ou vela.

*Ibidem*, assegura que cerca de 500 a 900 d.C. aparecem os primeiros moinhos de vento desenvolvidos para moer grãos de milho e bombagem de água na Pérsia e somente com os chineses, cerca de onze séculos depois, no ano 1000 d.C. é que surgem os moinhos de vento com tecnologia de orientação manual da direcção do vento, porém, também utilizavam pás de tecido (Figura 2.5b).



**Figura 2. 5:** Evolução das tecnologias eólicas: a) 1700a.C., b) 1000d.C., c) 1270 d.C., d) Meados do século XIX, e) Finais do século XIX, f) Finais do século XX (Fonte: Recriada de Marques, 2004 e Resende, 2010)

De acordo com Resende (2010) na década de 1270, no oeste europeu, houve grande avanço na aparência dos moinhos pelo surgimento do primeiro moinho de vento com uma configuração de eixo de rotação horizontal que contava com quatro pás de madeira (Figura 2.5c) cuja finalidade ainda era de moer grãos de milho e bombagem de água.

Nos EUA, ainda com a finalidade de moagem de grãos de milho e bombagem de água, nos meados do século XIX, surgem os primeiros moinhos de vento auto-reguláveis do tipo leque ou americanos apresentando um eixo de rotação horizontal, 20 pás de metal e a cauda para orientar o moinho na direcção do vento tal como está mostrado na Figura 2.5d) (*Ibidem*).

Como se pode notar, durante centenas de anos, a mais importante aplicação dos moinhos de vento era para subsistência, sendo utilizados para bombear água e moer grãos. No entanto, no final do século XIX, surgem os primeiros sistemas que utilizavam a energia do vento para a geração de electricidade. Segundo Resende (2010) o primeiro sistema eólico utilizado para gerar energia eléctrica em grande escala foi construído em Cleveland, em 1888, por Charles Brush. O sistema eólico construído por Brush contava com 144 pás de madeira, 17m de diâmetro com uma cauda que orientava o rotor na direcção do vento como está mostrado na Figura 2.5e).

Durante o século XX, o crescimento rápido do consumo de electricidade e os choques petrolíferos da década de 1970, motivaram a aplicação do princípio de funcionamento do tradicional sistema de Brush que conduziu à instalação das primeiras turbinas eólicas comerciais no início da década de 1980 na Europa e nos EUA (Marques, 2004). Desde então, as tecnologias de conversão da energia eólica têm registado um desenvolvimento considerável que se estende desde as técnicas de construção cada vez mais robustas até à utilização de sistemas de conversão com possibilidade de serem explorados em velocidade variável (Figura 2.5f).

### **2.5.2 Moinho de Vento para Bombagem de Água**

O funcionamento do moinho de vento para bombagem de água (MVBA) baseia-se no aproveitamento do movimento da massa de ar, que ao passar pela hélice faz com que suas pás girem. O movimento giratório das hélices geram um torque que é transformado através da manivela por meio da haste de accionamento da bomba de pistão suga a água contida no poço e que por sua vez, ao comprimir, a água é bombeada para o reservatório de água por meio de um tubo de recalque (Silva, *et al.*, 2003).

É possível utilizar vários tipos de bomba para a elevação da água. Usualmente, esta estrutura é instalada em conjunto com uma bomba do tipo pistão. Este sistema de bombeamento é constituído por rotor eólico, bomba hidráulica, transmissão e dispositivo de controlo (Figura 2.6). Como funcionam somente com a energia à disposição no momento, produzem potência variável ao longo do dia. Na Figura 2.6 tem-se o esquema da estrutura de um moinho de vento utilizado para bombear água.

O MVBA é geralmente utilizado para bombear água para reservatórios posicionados a alturas elevadas, muitas vezes na própria torre de sustentação do cata-vento. Do reservatório a água pode então ser distribuída por gravidade a sistemas de irrigação.

Para a escolha do sistema que atenda a vazão em função da altura, deve ser considerada a demanda diária de água em função da época do ano e da capacidade máxima de armazenamento deste volume. Uma necessidade básica para a instalação do sistema é que a região tenha ventos acima de 2,5m/s (Embrapa, 2010).

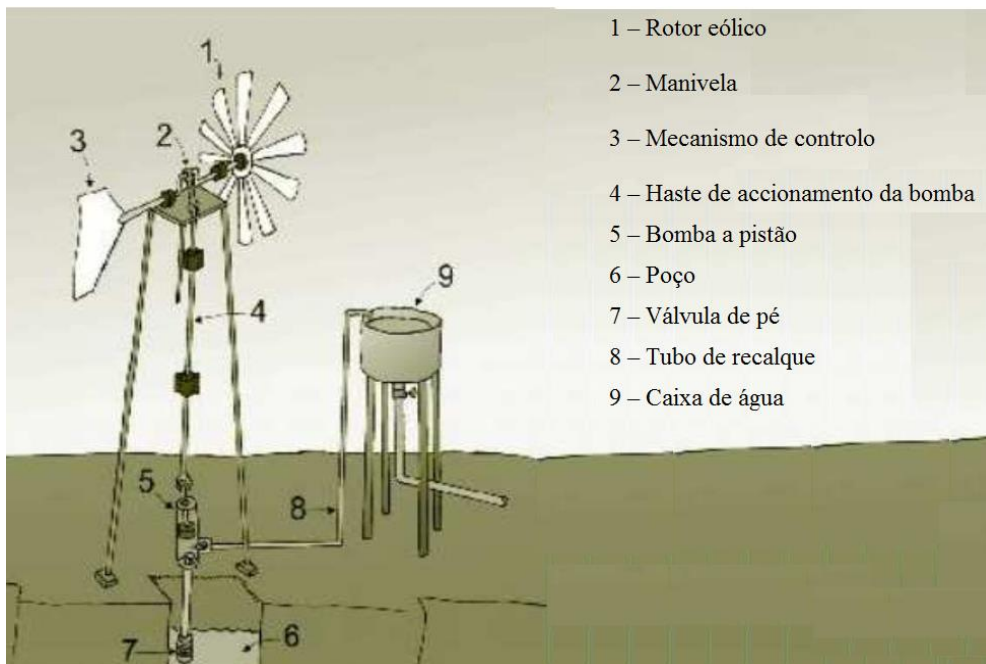
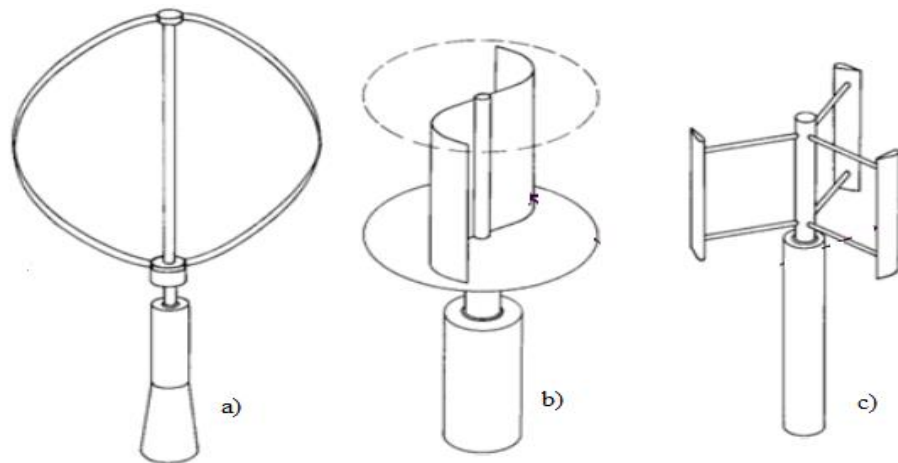


Figura 2. 6: Moinho de vento (Fonte: Recriada de Embrapa, 2010)

### 2.5.3 Turbinas Eólicas Actuais e Princípio Básico de Funcionamento

As turbinas eólicas são equipamentos usados para extrair energia cinética do vento e convertê-la em eléctrica. As turbinas eólicas podem ser classificadas segundo vários critérios e o mais importante é aquele que utiliza a orientação do eixo de rotação como factor de classificação. Assim, tem-se as turbinas de eixo de rotação horizontal (TERH) e as turbinas de eixo de rotação vertical (TERV) (Santos, *et al.*, 2006: p.40).

Os principais tipos de TERV são *Darrieus* (Figura 2.7a), *Savonius* (Figura 2.7b) e *Darrieus* tipo H (Figura 2.7c). As TERH são as mais comuns e grande parte da experiência mundial está voltada para a sua utilização. As TERH são classificadas segundo o porte em: pequenas ó potência nominal menor que 500kW (Figura 2.8a); médias ó potência nominal entre 500kW e 1000kW (Figura 2.9b); e grandes ó potência nominal maior que 1MW (Figura 2.8c).



**Figura 2. 7:** Turbinas eólicas de eixo de rotação vertical - a) Darrieus b) Savonius e c) Darrieus tipo H (Fonte: Santos *et al.*, 2006)

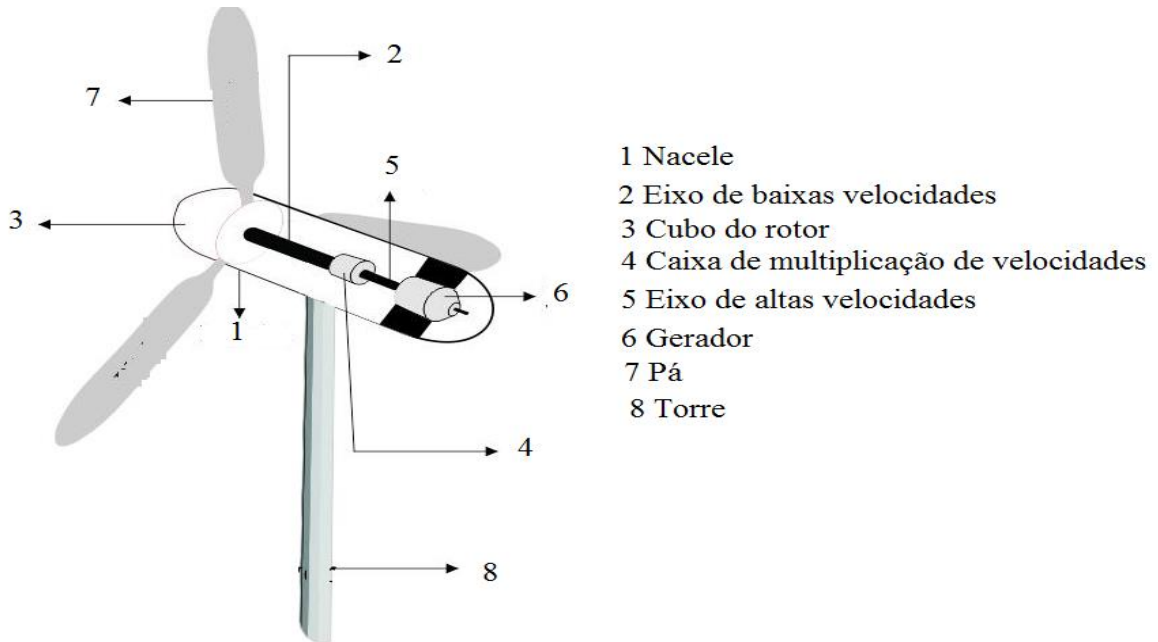


**Figura 2. 8:** TERH a) pequeno porte; b) médio porte e c) grande porte (Fonte: Resende, 2010)

A maioria das turbinas eólicas modernas, como a de pequeno porte (TEPP) mostrada na Figura 2.9, é, em geral, constituída por três pás, cubo do rotor, torre de sustentação a alturas preferenciais e nacele. Nacele trata-se da pequena casa onde se encontram o eixo de baixas velocidades, a caixa de multiplicação de velocidades, o eixo de altas velocidades e o gerador.

Em geral, as turbinas ficam orientadas para a posição de proveniência do vento. Quando o vento sopra, ao montante da turbina, junto às pás forma-se uma região de baixas pressões e, à jusante, regiões de altas pressões. Este gradiente de pressão faz com que as pás entrem em movimento rotacional. Este movimento é comunicado ao eixo de baixas velocidades ligado a caixa de multiplicação de velocidades, onde se transforma as baixas velocidades em altas. O eixo de altas

velocidades liga-se a um gerador de energia eléctrica o qual converte a energia mecânica do eixo de altas velocidades em energia eléctrica.



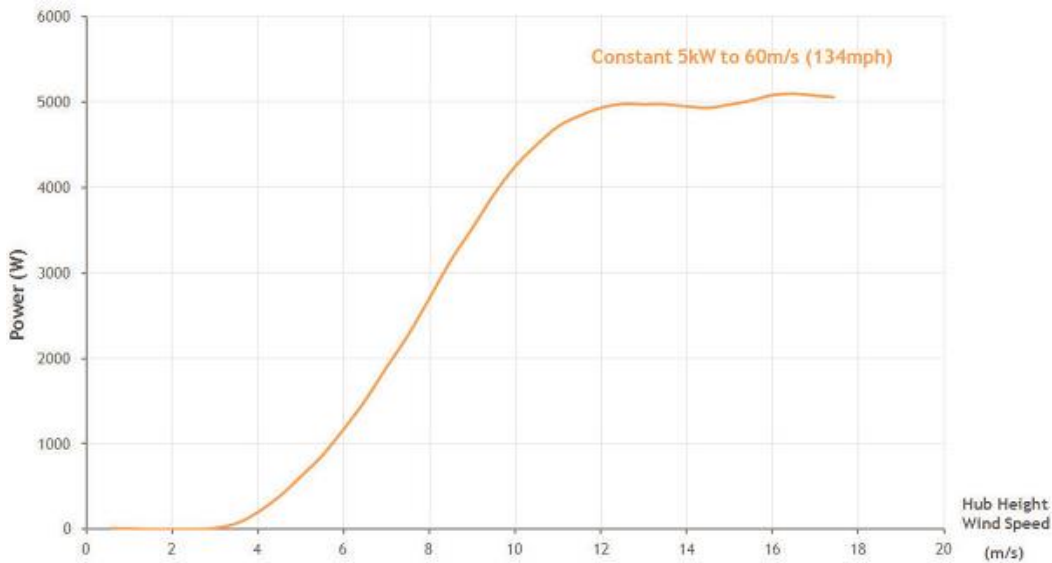
**Figura 2. 9:** Componentes básicos de turbinas eólicas de pequeno porte (Fonte: Recriada de Evance, 2011)

#### 2.5.4 Curva de Potência de Turbina Eólica de Pequeno Porte

As TEPP são projectadas para começarem a produzir potência a um mínimo de velocidade do vento, cerca de  $3m/s$ , velocidade chamada de *cut-in*. Para velocidades superiores, a potência cresce aproximadamente com o cubo da velocidade até o limite máximo do gerador eléctrico, que é conhecida como sendo potência nominal ( $P_N$ ) e a velocidade do vento correspondente a esta potência é designada por velocidade nominal ( $v_N$ ) que varia de  $12$  a  $60m/s$  (Castro, 2012).

Para velocidades superiores a  $v_N$ , mecanismos aerodinâmicos do rotor procuram conter um aumento da potência, mantendo-a próxima ao valor nominal.

Embora semelhantes nessas linhas gerais, cada modelo de TEPP reage de maneira ligeiramente diferente as diferentes velocidades de vento. Na Figura 2.10 está mostrada a curva de potência de uma turbina tomada como exemplo, a Evance R9000.



**Figura 2. 10:** Curva de potência de Evance R9000 (Fonte: Evance, 2011)

Os parâmetros de operação da turbina Evance R9000 estão mostrados totalmente na Tabela A.1. A turbina Evance R9000 produz uma potência nominal de  $5kW$  na velocidade de  $12$  a  $60m/s$  e a velocidades de *cut-in* é  $3m/s$ .

## 2.6 Estudos dos Regimes de Vento em Moçambique

Em Moçambique, estudos relacionados com a presente pesquisa já foram feitos, e todos indicam um considerável potencial eólico ao longo da costa e em algumas zonas mais elevadas no interior. Cuamba *et al.* (2011) avaliou os regimes de vento em Moçambique através da descrição geográfica, da utilização de mapas topográficos e hidrológicos e da análise dos dados do vento registados (em parte de forma intermitente) pelo INAM de 1971 a 1990 nas estações de Maputo, Beira e Mocímboa da Praia. A partir desta fonte, a média anual da velocidade do vento a 10m de altura varia de 4 a 5m/s. No entanto, os dados de vento utilizados foram medidos quatro vezes por dia e a produção anual de energia não foi levada em conta. Análise de dados de vento por hora poderia dar uma melhor compreensão sobre os regimes de vento.

Hammar (2011) fez um estudo sobre o recurso eólico abrangendo Moçambique e Tanzânia, baseando-se nos resultados de Cuamba *et al.* (2011) e valores médios estimados com base em reanálise de dados meteorológicos e de satélite de 1983-2005, obtidos a partir do banco de dados da Meteorologia de Superfície e Energia Solar MSES (NASA, 2009) com resolução de cobertura



mundial. Nisto constatou-se que a maioria das partes de Moçambique tem velocidades do vento relativamente baixas, com excepção de Cabo Delgado e costa de Maputo, onde registam-se médias acima de 4m/s em todas as estações do ano. Contudo, Hammar (2011) não levou em conta a estimativa energética anual produzida, usou dados de satélite com um nível de 20-25% de incerteza (NASA, 2009) e não analisou as particularidades de Vilankulo. Os dados colectados no local podem ser mais adequados para avaliar com precisão o recurso de energia eólica.

Cuinica *et al.* (2014) avaliou o potencial eólico da Costa de Maputo, baseando-se em dados localmente medidos a 10, 29 e 49m de altura na Costa de Sol e Ponta de Ouro. Este constatou que o recurso eólico modelado para 50m de altura varia de 4,64-7,67m/s predominado de sudoeste na Costa do Sol e de 5,69-10,05m/s soprando de Nor-nordeste e Sudoeste na Ponta do Ouro. A densidade de potência variou de 106-485W/m<sup>2</sup> para Costa do Sol e de 187-1067W/m<sup>2</sup> na Ponta de Ouro. No entanto, este estudo abrangeu apenas a costa de Maputo e estudos idênticos poderiam ser promovidos em outras zonas costeiras.

Zucule (2011) avaliou a energia do vento para a geração da eléctrica em Moçambique, baseando-se, para o caso de Vilankulo, em dados colectados pela estação meteorológica (de 2002 a 2003) com um de défice de 15,6% dos dados. Este constatou que a velocidade média naquela região é de 3,25m/s, a densidade de potência é de 45W/m<sup>2</sup> e a direcção do vento predominante é S, com 17,5% de contribuição. No entanto, dados mais recentes e com o défice reduzido poderiam ser mais precisos na caracterização dos ventos actuais.

## CAPÍTULO III: METODOLOGIA

### 3.1 Descrição da Área do Estudo

O distrito de Vilankulo situa-se no litoral de Moçambique, a norte da província de Inhambane, estendendo-se entre os paralelos  $21^{\circ} 48'$  e  $22^{\circ} 47'$  Sul e os meridianos  $34^{\circ} 30'$  e  $35^{\circ} 7'$  Este. Com uma superfície de  $4700\text{km}^2$ , a Sul faz fronteira com o distrito de Massinga, a Oeste com os distritos de Mabote e Massinga e a Este com o litoral do Oceano Índico.

Ao longo do litoral do oceano situam-se dunas costeiras e mais para o interior aparecem as chamadas dunas do interior. As elevações de maior altitude encontram-se na parte insular, destacando-se a ilha de Bazaruto com 120m (Chambela, 1999, p.28). Na parte continental a maior elevação regista-se no Cabo de São Sebastião, não ultrapassando, contudo os 90m (*Ibidem*).



**Figura 3. 1:** Topografia de Vilankulo (Fonte: Global Mapper16®)

A posição do distrito em relação aos centros de acção é de fundamental importância para explicar as características do clima. A ela associa-se o facto de estar na costa. A zona Sul de Moçambique é influenciada por um regime de anticlones e de depressões do Atlântico e do Índico. Segundo Ferreira citado por Chambela (1999), durante a estação seca, forma-se um anticiclone de origem

térmica na África meridional, entre os centros ciclónicos do Índico e Atlântico, cujos ventos fazem-se sentir ao longo da costa de África, desde Sul de Angola até Moçambique a sul do paralelo 20° S, onde Vilankulo está incluso.

A estação meteorológica de Vilankulo constitui a fonte de medição dos principais dados de entrada da presente pesquisa. Trata-se de uma estação meteorológica da primeira classe cujos dados medidos têm a finalidade aeronáutica, sinóptica e climática e está localizada na latitude 22°00' S, longitude 35°19' E e altitude de 21m. A estação meteorológica de Vilankulo funciona desde o ano 1960 cp<sup>2</sup>.

### 3.2 Colecta e Validação dos Dados

Os dados da presente pesquisa, colectados na estação meteorológica de Vilankulo, são referentes a velocidade e direcção do vento, medidos a uma altura de 10m com base no anemómetro e cata-vento, respectivamente. A Tabela 3.1 mostra as características dos respectivos instrumentos. Os referidos dados colectados são horários e compreendem ao período de Setembro de 2011 a Agosto de 2014, registados das 5 às 21 horas.

**Tabela 3. 1:** Especificações dos instrumentos de medição usados em Vilankulo (Fonte: Müller, 2011)

Especificações	Sensor da velocidade do vento Fuess W20-1 cp <sup>2</sup>	Sensor da direcção do vento Fuess W20-2 cp <sup>2</sup>
Ponto de arranque	0,3m/s	0,5m/s
Faixa de medida	0 - 80m/s	1 - 359°
Precisão	±1,5% do valor medido	±2°
Sinal de saída	8 pulsos por revolução 0,7813kt/Hz	-
Temperatura de operação	-20 a +60°C	-20 a +60°C
Humidade de operação	-	0 a 100%
Número de copos	3	-
Diâmetro do copo	100mm	-
Diâmetro da roda copo	410mm	-
Massa	1,5 kg	1,5 kg
Raio do giro da palheta	-	430mm

<sup>2</sup> Informação fornecida via telefone pelo Delegado provincial do INAM-Inhambane, Sr. Viriato Sansão Macaringue, no dia 2015.17.02

A validação dos dados pode ser feita manualmente ou através de programas computacionais como Excel. Muitas das vezes o processo de validação de dados é baseado no critério de teste de gama (Tabela 3.2).

**Tabela 3. 2:** Critério de teste de gama (Fonte: Bailey *et al.*, 1997)

Parâmetro	Critério de validação	
	Velocidade	Direcção
Média	$0 < \text{Média} < 25 \text{ m/s}$	$0^\circ < \text{Média} < 360^\circ$
Desvio-Padrão	$0 < \text{Desvio-Padrão} < 3 \text{ m/s}$	$3^\circ < \text{Desvio-Padrão} < 75^\circ$
Rajada Máxima	$0 < \text{Rajada Máxima} < 30 \text{ m/s}$	$0^\circ < \text{Rajada Máxima} < 75^\circ$

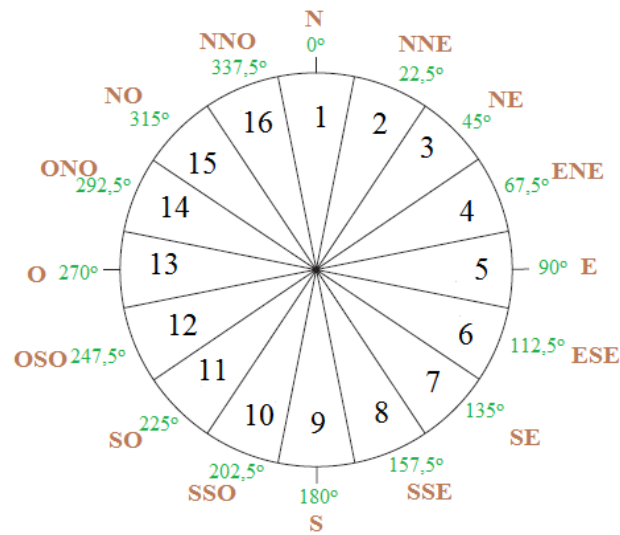
O passo seguinte é a determinação da taxa de recuperação de dados,  $T_{RD}$ , a qual deve ser superior a 90% (Bailey *et al.*, 1997). Esta é definida como sendo a razão da quantidade dos dados colectados ( $Q_{DC}$ ) pela quantidade dos dados possíveis ( $Q_{DP}$ ), dada pela equação (3.1).

$$T_{RD} = \frac{Q_{DC}}{Q_{DP}} \times 100\% \quad (3.1)$$

### 3.3 Distribuição da Direcção do Vento

A notação relativa à orientação do vento é dada através dos ângulos pronunciados entre a direcção do vento e o Norte Geográfico. Por exemplo, se o vento for originário de Norte, a sua direcção será de  $0^\circ$ . Para fins de pesquisa costuma-se dividir a rosa-dos-ventos em 8, 12 ou 16 sectores para aferir a direcção do vento.

No presente estudo será usada a rosa-dos-ventos de 16 sectores numerados no sentido horário, compreendendo cada sector um intervalo de ângulo de  $22,5^\circ$ , nomeadamente: Norte - N ( $0^\circ$ ), Nor-nordeste - NNE ( $22,5^\circ$ ), Nordeste - NE ( $45^\circ$ ), És-nordeste - ENE ( $67,5^\circ$ ), Este E ( $90^\circ$ ), És-sudeste - ESE ( $112,5^\circ$ ), Sudeste SE ( $135^\circ$ ), Su-sudeste - SSE ( $157,5^\circ$ ), Sul - S ( $180^\circ$ ), Su-sudoeste - SSO ( $202,5^\circ$ ), Sudoeste - SO ( $225^\circ$ ), Oés-sudoeste - OSO ( $247,5^\circ$ ), Oeste - O ( $270^\circ$ ), Oés-noroeste - ONO ( $292,5^\circ$ ), Noroeste - NO ( $315^\circ$ ) e Nor-noroeste - NNO ( $337,5^\circ$ ), conforme indica a Figura 3.2.



**Figura 3.2:** Rosa-dos-ventos dividido em 16 sectores com os respectivos ângulos horários e nomes (Fonte: Recriada de Jonathan, 2010)

### 3.4 Tratamento Estatístico da Velocidade do Vento

#### 3.4.1 Média e Desvio-Padrão

Numa análise estatística da velocidade do vento, os parâmetros mais úteis são a média e o desvio padrão. A média é determinada pela seguinte Equação (3.2):

$$v_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (3.2)$$

onde  $n$  é o número de dados e  $v_i$  é a velocidade de vento observada. O desvio-padrão indica-nos a variabilidade dos dados em torno da média e é dado pela equação (3.3) que se segue:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_m)^2}{n}} \quad (3.3)$$

#### 3.4.2 Distribuição de Weibull

Os registos da densidade de probabilidade para a posterior estimativa de potência ganham importância se forem descritos por expressões analíticas. De acordo com Cuinica *et al.* (2014), a

distribuição de Weibull é uma das mais utilizadas para aplicações de energia eólica, pois dá um melhor ajuste à velocidade do vento medido, num determinado local ao longo de um determinado período de tempo.

A distribuição de Weibull é definida por duas funções principais, nomeadamente: a função de densidade da probabilidade e a acumulada. Segundo Akpinar e Akpinar citado por Cuinica *et al.* (2014), a função densidade da probabilidade  $f_w(v)$  define a fracção do tempo no qual o vento de determinada velocidade  $v$  prevalece e é dada pela equação (3.4) seguinte:

$$f_w(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (3.4)$$

onde  $f_w(v)$  é a frequência de ocorrência da velocidade de vento;  $k$  é um parâmetro de forma (adimensional);  $c$  é o parâmetro de escala  $[m/s]$  e  $v$  é a velocidade do vento observada  $[m/s]$ . De acordo com Castro (2012) os parâmetros forma e de escala são respectivamente dadas pelas equações (3.5) e (3.6) seguintes:

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^{-1,086} \quad (3.5)$$

$$c = \frac{v_m k^{2,6674}}{0,184 + 0,816 k^{2,73855}} \quad (3.6)$$

O parâmetro de forma  $k$  é fundamental para as estimativas de custos de projectos. Para a maioria dos bons regimes de vento e economicamente viáveis, os valores de  $k$  variam de 1,5 a 3,0 (Akpinar e Akpinar citado por Cuinica *et al.*, 2014).

A função de probabilidade acumulada  $F_w(v)$  é dada pela equação (3.7) (*Ibidem*):

$$F_w(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (3.7)$$

### 3.5 Densidade da Potência do Vento

A densidade de potência permite-nos avaliar a energia disponível pelo fluxo do ar. A média da densidade de potência eólica  $P_w$  por unidade de área com base na função densidade de probabilidade de Weibull, é dada pela seguinte Equação (3.8) (Jonathan, 2010):

$$P_w(v) = \frac{1}{2} \rho A \int_0^{\infty} v^3 f_w(v) dv = \frac{1}{2} \rho c^3 \left( 1 + \frac{3}{k} \right) \quad (3.8)$$

onde  $\rho$  é a densidade média do ar, cujo seu valor é  $1,225 \text{ kg/m}^3$  no nível médio das águas do mar. Este é o valor a ser usado na presente pesquisa.

As estimativas da densidade de potência do vento podem ser classificadas em classes. A Tabela 3.3 mostra a classificação das densidades de potência e de velocidade do vento em classes a 10 e 30m de altura.

**Tabela 3.3:** Classes da densidade da potência do vento (Fonte: Jonathan, 2010 e Bailey *et al.*, 1997)

Classe da Potência do Vento	Altura de 10m		Altura de 30m	
	Densidade da Potência [ $\text{W/m}^2$ ]	Velocidade do Vento [ $\text{m/s}$ ]	Densidade da Potência [ $\text{W/m}^2$ ]	Velocidade do Vento [ $\text{m/s}$ ]
1	[0-100]	[0-4,4]	[0-160]	[0-5,1]
2	] 100-150]	] 4,4-5,1]	] 160-240]	] 5,1-5,9]
3	] 150-200]	] 5,1-5,6]	] 240-320]	] 5,9-6,5]
4	] 200-250]	] 5,6-6,0]	] 320-400]	] 6,5-7,0]
5	] 250-300]	] 6,0-6,4]	] 400-480]	] 7,0-7,4]
6	] 300-400]	] 6,4-7,0]	] 480-640]	] 7,4-8,2]
7	] 400-1000]	] 7,0-9,4]	] 640-1600]	] 8,2-11,0]

A classe 1 representa regiões de baixo potencial eólico, de pouco ou nenhum interesse para o aproveitamento da energia eólica. As classes 2 e 3 podem ou não ser favoráveis, dependendo das condições topográficas, dentre outras. As classes 4 a 7 correspondem aos melhores locais para aproveitamento da energia eólica (Jonathan, 2010).

### 3.6 Estimativa da Energia Disponível Baseado na Distribuição de Weibull

Uma vez obtida a representação da função da densidade da potência dos ventos por unidade de área, o valor esperado para a energia disponível por mês ou ano com base nos parâmetros de Weibull é, no caso geral, dado pela equação (3.9) (Castro, 2012) seguinte:

$$E_w = T \int_0^{\infty} f(v)P(v)dv = \frac{\rho c^3 T}{2} \left(\frac{3}{k}\right) \Gamma\left(\frac{3}{k}\right) \quad (3.9)$$

onde  $c$  e  $k$  são os factores de escala e de forma, respectivamente;  $f(v)$  é função da densidade de probabilidade da velocidade do vento;  $P(v)$  é a função da densidade da potência eólica e  $T$  é a constante de tempo. Numa estimativa anual, a constante do tempo  $T=8.760$  horas e numa estimativa mensal  $T=24*\text{número de dias do mês}$  horas. Os valores da função gama para cada argumento  $x$  variando de 0,90 a 1,55 estão indicados na Tabela 3.4

**Tabela 3. 4:** Valores da função gama em função do argumento  $x$  (Fonte: Khamis citado por Gautschi, 2009)

$x$	$\Gamma(x)$	$x$	$\Gamma(x)$	$x$	$\Gamma(x)$	$x$	$\Gamma(x)$	$x$	$\Gamma(x)$	$x$	$\Gamma(x)$
0,90	1,0686	1,01	0,9943	1,12	0,9436	1,23	0,9108	1,34	0,8922	1,45	0,8857
0,91	1,0607	1,02	0,9888	1,13	0,9399	1,24	0,9085	1,35	0,8912	1,46	0,8856
0,92	1,0530	1,03	0,9835	1,14	0,9364	1,25	0,9064	1,36	0,8902	1,47	0,8856
0,93	1,0456	1,04	0,9784	1,15	0,9330	1,26	0,9044	1,37	0,8893	1,48	0,8857
0,94	1,0384	1,05	0,9735	1,16	0,9298	1,27	0,9025	1,38	0,8885	1,49	0,8859
0,95	1,0315	1,06	0,9687	1,17	0,9267	1,28	0,9007	1,39	0,8879	1,50	0,8862
0,96	1,0247	1,07	0,9642	1,18	0,9237	1,29	0,8990	1,40	0,8873	1,51	0,8866
0,97	1,0182	1,08	0,9597	1,19	0,9209	1,30	0,8975	1,41	0,8868	1,52	0,8870
0,98	1,0119	1,09	0,9555	1,20	0,9182	1,31	0,8960	1,42	0,8864	1,53	0,8876
0,99	1,0059	1,10	0,9514	1,21	0,9156	1,32	0,8946	1,43	0,8860	1,54	0,8882
1,00	1,0000	1,11	0,9474	1,22	0,9131	1,33	0,8934	1,44	0,8858	1,55	0,8889

### 3.7 Extrapolação da Velocidade do Vento

As alturas de maior rentabilidade de turbinas eólicas modernas são geralmente de 80m (Castro, 2012). A extrapolação da velocidade do vento dá-nos uma estimativa da velocidade do vento a alturas superiores, a ser feita através da Equação (2.2) referida na Secção 2.2.2. O valor do comprimento de rugosidade,  $z_0$ , a ser usado nesta pesquisa é 0,0024 devido ao tipo de terreno



onde a estação meteorológica de Vilankulo está colocada conforme indica a Tabela 2.1 mencionada na Secção 2.2.2.

### 3.8 Potência e Vazão da Água do Moinho do Vento

Apesar das dificuldades associadas com a variação do vento, é possível estimar uma potência média efectiva para elevação da água (potência hidráulica) com base na velocidade média do vento na região de instalação do moinho. Para a estimativa da potência eólica média por unidade de área ao longo de um mês ou ano para bombagem de água é usada a Equação (3.10) (Silva *et al.*, 2003) que segue:

$$\bar{P}_{hid} = 0,1Av_m^3 \quad (3.10)$$

onde  $\bar{P}_{hid}$  é a potência hidráulica média estimada [W];  $v_m$  é a velocidade média do vento do local [m/s] e  $A$  é a área da pá do moinho [m<sup>2</sup>]. Tomando como exemplo o cata-vento FORTUNA de 3,28m de diâmetro, a área da pá será 8,45m<sup>2</sup>.

A vazão média da água exprime o volume de água que passa pela secção transversal do tubo na unidade de tempo. Esta depende da velocidade média e da altura para a qual se pretende elevar a água. A vazão contida pode ser calculada de maneira aproximada pela Equação (3.11) (*Ibidem*) que se segue:

$$Q_m = \frac{3600P_{hidr}}{\rho g H} \quad (3.11)$$

onde  $Q_m$  é a vazão contida [m<sup>3</sup>/h];  $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$  é a densidade da água;  $g = 9,81\text{m}/\text{s}^2$  é a aceleração da gravidade e  $H$  é a altura de elevação [m] da água, nesta pesquisa será assumida hipoteticamente como 25m.

## CAPÍTULO IV: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Estatística dos Dados do Vento

Os dados de direcção e velocidade do vento usados nesta pesquisa foram colectados da estação meteorológica de Vilankulo a uma altura de 10m. A Tabela 4.1 apresenta resumidamente os resultados da verificação dos dados.

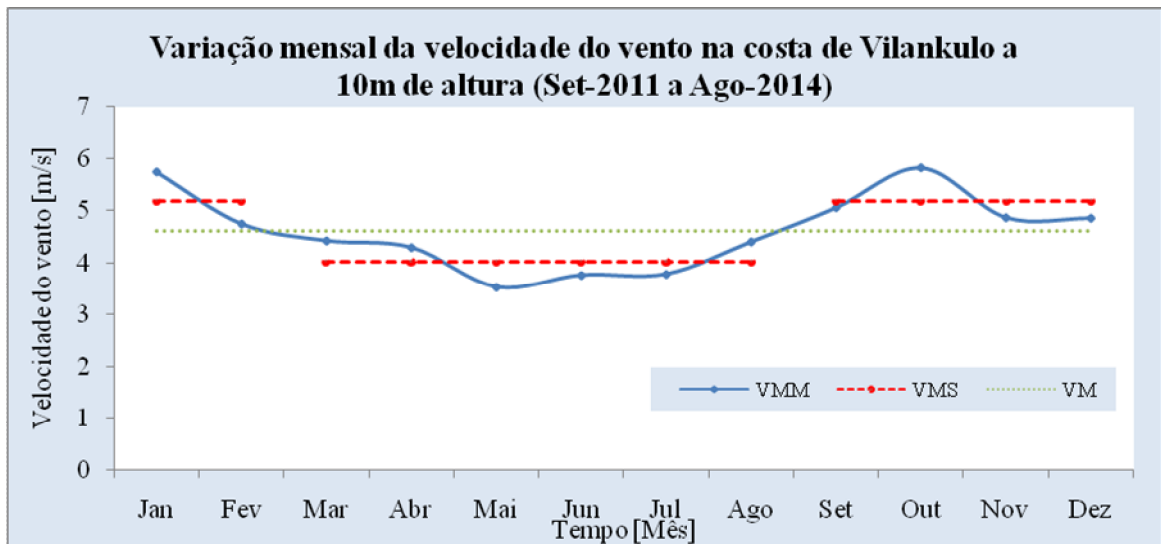
**Tabela 4. 1:** Apuramento dos dados do vento medidos na estação de Vilankulo a altura de 10m

Parâmetro	Parâmetro	
	Velocidade	Direcção
Quantidade de Dados Possíveis	18632	18632
Quantidade de Dados Válidos	18338	18315
Taxa de Recuperação de Dados ( $T_{RD}$ )	98,4%	98,3%
Valor mínimo	0	0
Valor máximo	16,96m/s	350°
Média	4,60m/s	142,8°
Desvio-Padrão	2,08m/s	91,3°

A  $T_{RD}$ , a média e o desvio-padrão da velocidade e direcção do vento estão dentro do critério de teste de gama apresentado na Tabela 3.4 (vide a Secção 3.6). A  $T_{RD}$  da velocidade, assim como da direcção do vento é superior a 90%, o que garante maior fiabilidade.

### 4.2 Variação Mensal da Velocidade do Vento

A variação da velocidade do vento ao longo do ano é resumidamente mostrada na Figura 4.1. A média da velocidade do vento é de 4,60m/s sendo que a máxima observada é de 5,81m/s. A mínima velocidade é de 3,53m/s observada no mês de Maio; a partir deste mês a velocidade tende a aumentar até atingir a máxima no mês de Outubro. Os meses de Novembro e Dezembro apresentam uma ligeira redução na velocidade do vento, voltando a aumentar em Janeiro, o mês a partir do qual a velocidade do vento reduz até atingir a velocidade mínima.



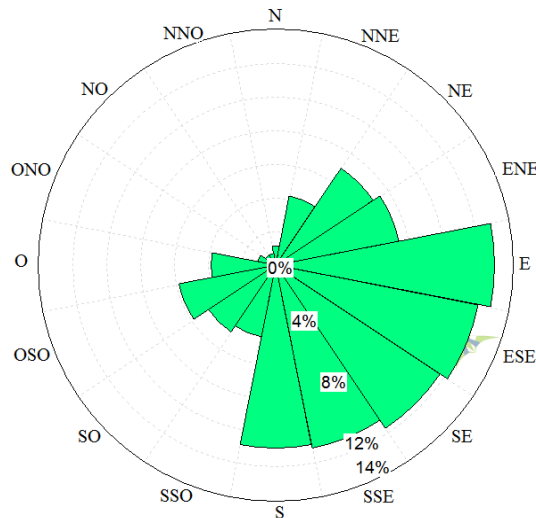
**Figura 4.1:** Variação mensal da velocidade do vento na costa de Vilankulo a 10m de altura (Setembro-2011 a Agosto-2014)

A Figura 4.1 mostra igualmente que nos meses de verão a velocidade do vento é relativamente maior que nos de inverno. Ricardo (2004: p.103) já se referia a este comportamento do vento ao afirmar que a variação da velocidade do vento é sazonal, aumentando a medida que a intensidade da radiação vai assumindo valores maiores ao longo das estações do ano. Além disso, a velocidade do vento é influenciada pelo facto de no verão, a superfície terrestre receber maior radiação solar que no inverno e conseqüentemente aquece-se mais a superfície durante o verão, o que aumenta a mistura do ar de altas velocidades em níveis mais elevados com o ar perto da superfície, portanto, a principal razão desta variação é a radiação solar que chega de forma diferenciada ao longo do ano.

### 4.3 Distribuição das Frequências da Direcção do Vento

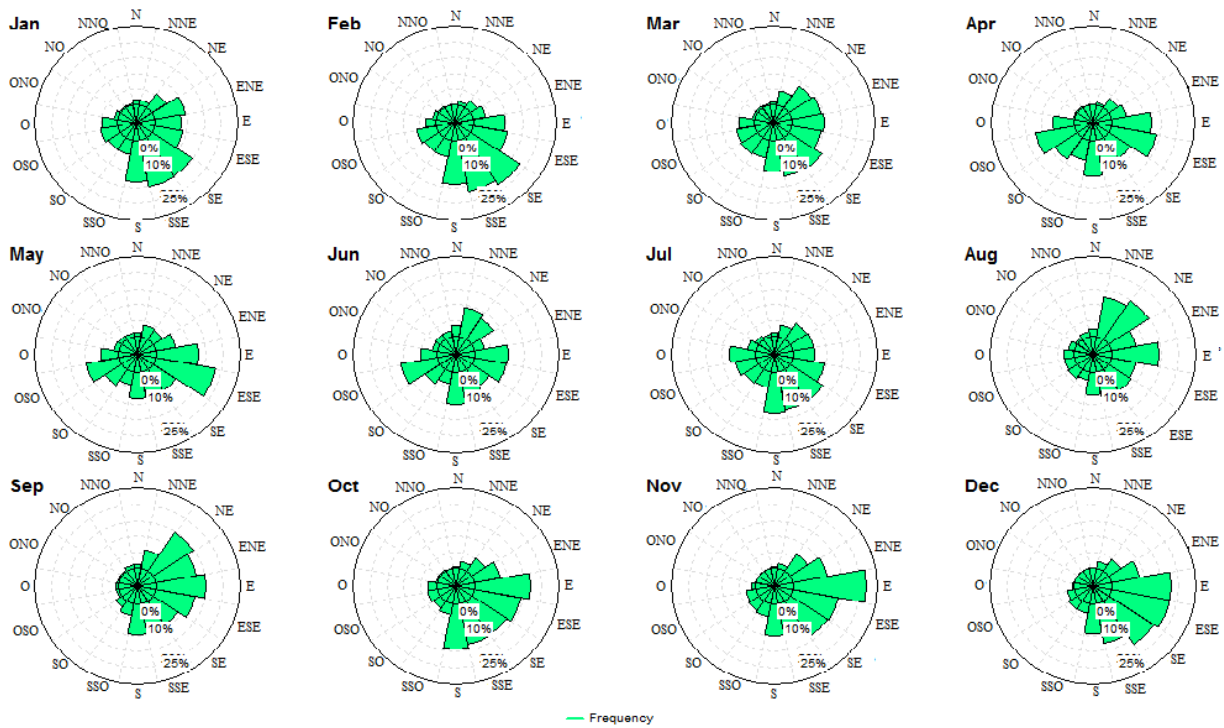
A Figura 4.2 mostra a distribuição das frequências da direcção do vento na zona costeira de Vilankulo. É notório que o sector que mais contribui é o de 90°, o sector E, com 12,94% dum total de 18632 horas abrangidas no período do estudo. Ainda nesta Figura 4.2 pode-se notar que os outros sectores mais contribuintes são ESE, SE, SSE e S que têm uma contribuição de 12,20%, 11,67%, 11,10% e 10,91%, respectivamente. A distribuição dos obstáculos em torno do ponto de medição pode ser determinante nas direcções mais predominantes, visto que a SE da estação meteorológica encontra-se as fozes dos rios Chicome e Matador, zona de ligação aberta com o

mar e com menor densidade de obstáculos em comparação com as demais zonas circunvizinhas (vide a Figura A.1). Além disso, é notório que a tendência das cinco direcções mais frequentes vão ao encontro do que Silva (2005) e García (2004) enfatizam ao tratar dos ventos globais sustentando que nas latitudes compreendidas entre  $0^{\circ}$  e  $30^{\circ}$  S, onde Vilankulo está abrangido, são predominantes os ventos alísios de SE.



**Figura 4. 2:** Rosa-dos-ventos da distribuição das frequências da direcção do vento

A direcção do vento ao longo do ano muda consideravelmente em função das estações do ano e mensalmente. A Figura 4.3 mostra as rosas-dos-ventos referentes à distribuição das frequências da direcção do vento por mês na qual pode-se notar que os meses de verão, i.e., de Setembro a Fevereiro apresentam uma tendência de provirem maioritariamente dos sectores compreendidos entre E e S. Durante o inverno, i.e., de Março a Setembro não há uma direcção predominante nítida, as direcções mais frequentes de cada mês apresentam alta dispersão variando de NNE a O.



**Figura 4.3:** Rosas-dos-ventos da variação mensal da direcção do vento

#### 4.4 Variação Horária da Velocidade do Vento

A Figura 4.4 mostra o perfil da variação horária da velocidade do vento das 5 às 21h que é o período onde houve registo de dados durante os três anos. A curva indicada a preto demonstra a variação das médias mensais da velocidade do vento, através dela pode-se constatar que a mínima média da velocidade é de 2,76m/s observada as 5h. A partir desta hora, a velocidade aumenta até atingir o seu máximo valor de 5,69m/s as 15h. No período das 7 as 11h há um aumento considerável da velocidade do vento e volta a registar-se uma acentuada variação das 15 a 21h no sentido diminutivo.

Numa visão *õdiurnalõ* pode-se notar ainda na Figura 4.4 que o período do dia com maiores velocidades é o da tarde com uma média de 5,46m/s seguido pelo período da noite com uma média de 4,69m/s e por fim o período da manhã que regista velocidades abaixo da média (3,95m/s). Este comportamento da velocidade do vento deve-se ao facto de o vento ser consequência da radiação solar pelo que, logo depois de o Sol nascer, a radiação solar começa a aquecer a superfície da Terra fazendo com que partículas do ar quente adjacente a superfície terrestre comecem a subir e sendo substituídos pelas partículas de ar da vizinhança da zona de

baixas temperaturas (altas pressões); esse processo tende a se fortificar a medida que a radiação solar recebida pela superfície terrestre vai aumentando durante o dia.

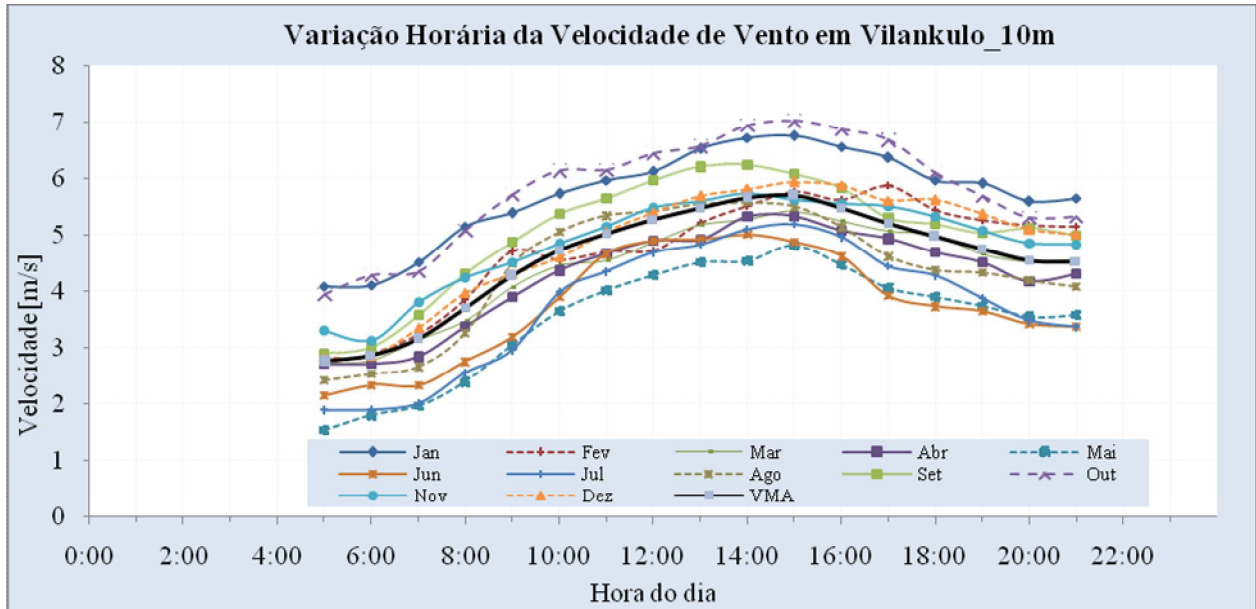
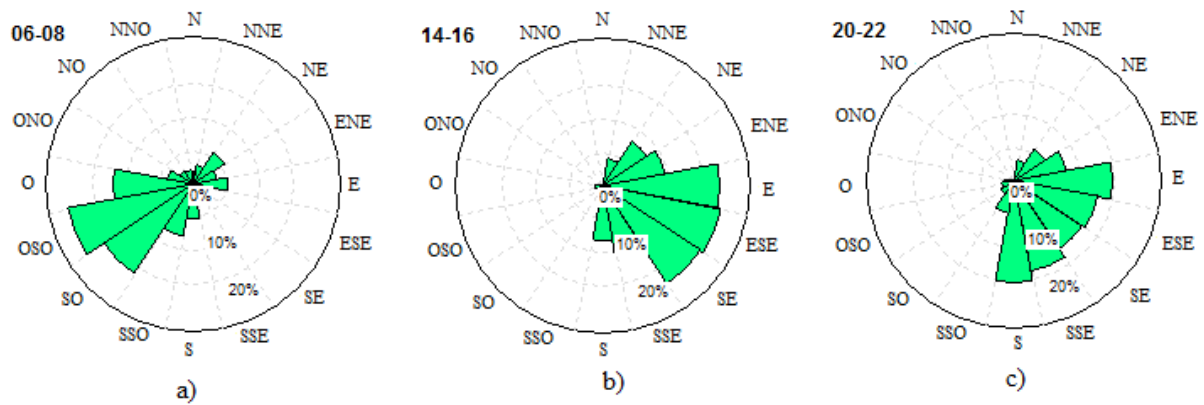


Figura 4. 4: Comportamento horário da velocidade do vento a 10m de altura (Setembro-2011 a Agosto-2014)

Ainda com na Figura 4.4 pode-se notar que as curvas da velocidade horária do vento nos meses de inverno encontram-se, em geral, abaixo da média anual e as curvas horárias dos meses de verão encontram-se, em, geral acima da média.

#### 4.5 Variação “Diurnal” da Direcção do Vento

A variação *diurnal* da direcção do vento está apresentada na Figura 4.5. A direcção predominante na madrugada não está mostrada devido a insuficiência de dados referentes a esse período. O período da manhã está representado pelo intervalo das seis às oito horas onde predomina o vento de OSO, este sector contribui com uma frequência de 19,11%. O período da tarde está representado pelo intervalo das 14 às 16h onde a direcção predominante é ESE com 18,19% de frequência e, por fim, a direcção do vento predominante no período da noite é a do sector E com uma frequência de 15,45%.

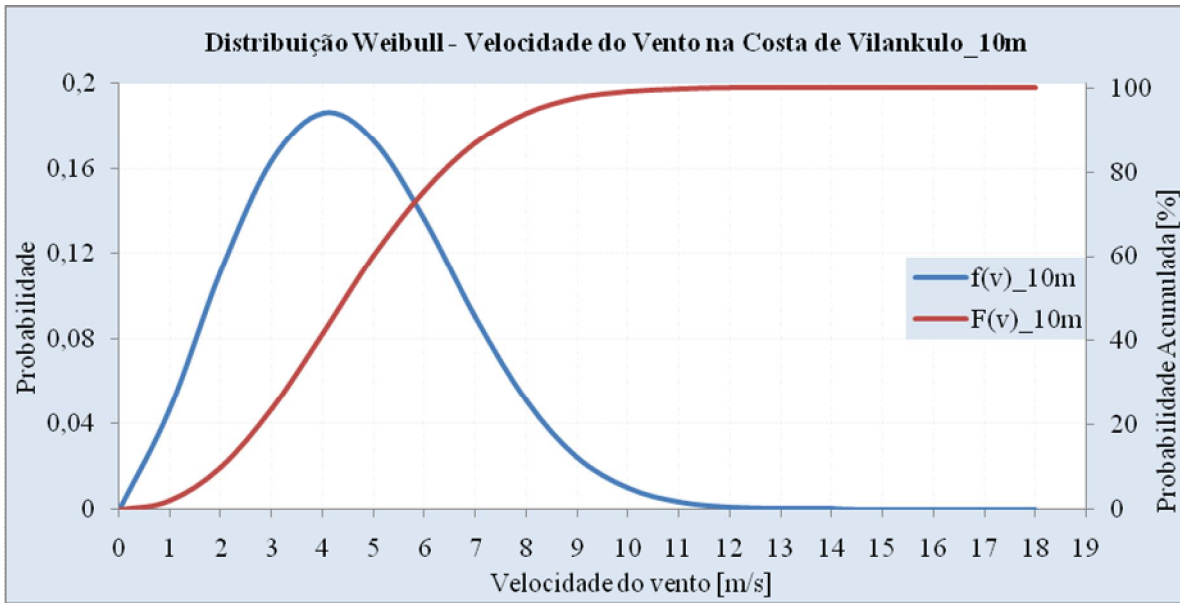


**Figura 4.5:** Rosas-dos-ventos representativas da direcção do vento ao longo do dia: a) manhã b) tarde e c) noite

A Figura A.2 mostra as rosas-dos-ventos das frequências da direcção do vento em intervalo de duas em duas horas ao longo do dia. Em geral, a direcção do vento ao longo do dia tende a mudar de OSO nas manhãs, ESE nas tardes e E, S e SSE nas noites. Este comportamento da direcção do vento vai ao encontro do que Mendes & Gomes (2007: p.10) sustentam ao se referirem das brisas afirmando que *“As brisas distinguem-se em marítima, quando o vento sopra do mar para a terra, geralmente ao entardecer, e em brisa terrestre, quando o vento sopra da terra para o mar, ao amanhecer”*. No entanto, o período da noite não tem uma direcção predominante nítida por neste período ser a de tendência de equilíbrio de pressão entre a terra e o mar fazendo com que a influência das brisas seja pouco notável.

#### 4.6 Distribuição Weibull de Probabilidades das Velocidades do Vento

A Figura 4.6 mostra a distribuição Weibull de probabilidade das velocidades do vento. Tal distribuição das velocidades do vento é assimétrica positiva, o que significa que às vezes observa-se velocidades do vento muito altas, porém, raras. Durante a metade do ano, no período das 5 as 21 horas, o vento sopra com velocidade abaixo de 4,63m/s e a outra metade, com velocidade superior àquela. Por outro lado, as velocidades de vento de 4,11m/s são mais comuns. Os 4,11m/s são chamados de valor modal da distribuição. Os valores dos parâmetros de forma e de escala desta distribuição são 2,37 e 5,19m/s, respectivamente. O valor do parâmetro de forma está dentro do intervalo dos bons regimes de vento e economicamente viáveis.



**Figura 4. 6:** Distribuição Weibull de probabilidades das velocidades do vento ( $k=2,37$  e  $c=5,19\text{m/s}$ )

Tanto a turbina Evance R9000, a tomada como exemplo, assim como a maioria das TEPP têm velocidade de *cut-in* de 3m/s. A fracção de tempo em que a velocidade é inferior a 3m/s durante um ano é de 24,10% no intervalo das 5 as 21 horas e, por conseguinte, velocidades acima de 3,0m/s compõem os restantes 75,90% correspondente a um pouco mais de nove meses disponíveis para as turbinas eólicas gerarem energia eléctrica durante um ano. Portanto a 10m de altura, na costa de Vilankulo, a fracção de tempo disponível com ventos acima de 3m/s é bastante para implementação de TEPP para geração de electricidade.

O moinho de vento para bombagem de água começa a operar com velocidade igual a 2,5m/s, tal como foi referido na Secção 2.5.2. A fracção do tempo em que a velocidade do vento é inferior a 2,5m/s é de 16,92% no intervalo diário das 5 as 21 horas e, portanto, velocidades acima de 2,5m/s compõem os restantes 83,08% o correspondente a 5155 horas por ano estão disponíveis para os moinhos de vento bombearem água. Portanto, a 10m de altura existe tempo suficiente com velocidades superiores da do começo de funcionamento de moinhos de vento para bombagem de água e, por conseguinte, na zona costeira de Vilankulo pode-se fomentar a implementação de moinhos de vento para bombagem de água.



#### 4.7 Variação Vertical da Velocidade do Vento

A Figura 4.7 mostra a variação mensal da velocidade do vento a alturas de 10, 25, 50 e 100m. Na altura de referência (10m), a média da velocidade do vento é de aproximadamente 4,60m/s. Tanto nos dados observados na altura de referência assim como em velocidades extrapoladas, os meses de mínimos e de máximos valores são Maio e Outubro, respectivamente.

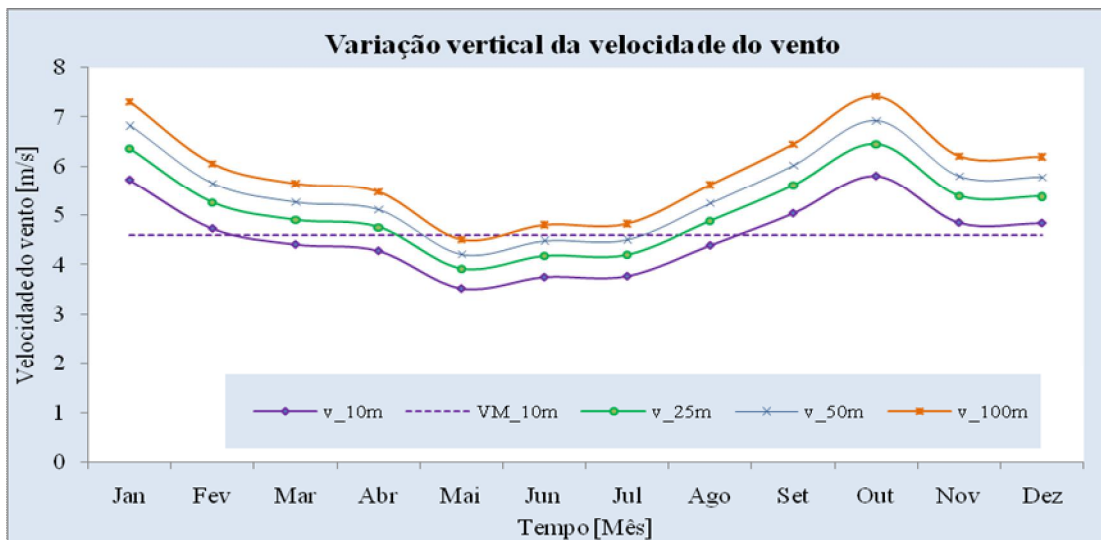


Figura 4. 7: Variação vertical da velocidade do vento

A velocidade do vento na costa de Vilankulo aumenta com o aumento da altura, variando de 4,53-7,38m/s, 5,30-8,62m/s e 6,06-9,85m/s para alturas de 25, 50 e 100m, respectivamente. Estas alturas são as preferenciais das turbinas eólicas de grande porte, portanto, com base na velocidade extrapolada a partir de 25 a 100m de altura a velocidade do vento está acima do *cut-in* da maioria das turbinas eólicas de grande porte (4,0m/s), o que garante haver recurso eólico suficiente para o funcionamento destas durante maior parte do tempo ao longo de um ano.

#### 4.8 Estimativa da Densidade de Potência Energética e Hidráulica, Energia e Vazão

A densidade de potência energética e energia disponível determinadas com base na distribuição de Weibull, a potência hidráulica e a respectiva vazão média estimadas, referentes a velocidade do vento medido a 10m de altura na costa de Vilankulo estão mostradas na Tabela 4.2.

**Tabela 4. 2:** Densidade de potência energética, potência hidráulica, energia e vazão estimadas na costa de Vilankulo a 10m de altura

Mês	$v_m [m/s]$	$\sigma [m/s]$	$k$	$c [m/s]$	$P_w [W/m^2]$	$E_w [kWh]$	$P_{hidr} [W]$	$Q_m [l/h]$
Jan	5,73	2,26	2,75	6,44	343	127	159	2334
Fev	4,74	2,05	2,49	5,34	158	70	90	1320
Mar	4,42	1,75	2,74	4,97	158	58	73	1071
Abr	4,29	1,9	2,42	4,84	155	56	67	979
Mai	3,53	1,75	2,14	3,99	93	35	37	546
Jun	3,76	1,97	2,02	4,24	116	44	45	659
Jul	3,78	2,04	1,95	4,26	120	48	46	670
Ago	4,40	2,16	2,17	4,97	179	69	72	1057
Set	5,05	2,06	2,65	5,69	240	86	109	1597
Out	5,81	2,23	2,83	6,53	351	130	166	2433
Nov	4,86	1,65	3,23	5,43	189	69	97	1423
Dez	4,85	1,79	2,95	5,44	199	74	96	1415
Anual	4,60	2,08	2,37	5,19	194	860	83	1209

O parâmetro forma varia de 1,95-2,95 entre os meses de Julho e Dezembro, sendo um intervalo dos bons regimes de vento e economicamente viáveis. O parâmetro de escala varia de 3,99-6,53m/s entre os meses de Maio e Outubro. A densidade de potência mensal varia de 90W/m<sup>2</sup> em Maio a 351W/m<sup>2</sup> em Outubro, sendo 194W/m<sup>2</sup> a densidade média anual. Isto revela que a costa de Vilankulo enquadra-se na terceira classe, a qual pode ou não se recomendar para a implementação de turbinas eólicas, conforme a Tabela 3.3. A energia eléctrica estimada por unidade de área nesta região costeira, a uma altura de 10m, varia de 35kWh em Maio a 130kWh em Outubro e ao fim de um ano estima-se em 860kWh. Este valor anual é, em geral, considerado recomendável para aproveitamento da energia eólica usando turbinas de pequeno porte.

Para a bombagem de água usando o moinho FORTUNA de 3,28m de diâmetro e com altura de elevação da água hipoteticamente assumida como 25m, i.e., da profundidade a que se encontra a água até ao reservatório, constatou-se que a potência hidráulica média estimada varia de 37 a 166W entre os meses de Maio a Outubro, respectivamente. A potência hidráulica média anual é de 83W. A vazão média mensal estimada varia de 546 a 2433/h entre os meses de Maio e Outubro, sendo a vazão média anual de 1209/h. Este valor é suficiente para suprir a demanda de água para fins de consumo pessoal, gado bovino, irrigação dos campos, etc.

## CAPÍTULO V: CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 Conclusões

No presente trabalho foram analisados os dados do vento da estação meteorológica de Vilankulo a fim de avaliar o potencial da energia eólica na zona costeira daquela região, para fins de geração de energia eléctrica e/ou bombagem de água. Finda a pesquisa, pode-se concluir que os objectivos específicos foram alcançados conforme se segue:

- a) Na altura de 10m, a velocidade média do vento na zona costeira de Vilankulo é de 4,60m/s, a mínima média mensal é de 3,53m/s observada no mês de Maio e a máxima é de 5,81m/s observada no mês de Outubro. Os meses de verão apresentam maior média da velocidade do vento de 5,18m/s em relação aos do inverno que apresentam 4,03m/s. A velocidade média do vento atinge o pico por volta das 14:00 - 17:00 enquanto o mínimo se dá em torno das 05:00 - 06:00 no período do dia analisado. A direcção do vento predominante é E ao longo do ano. ESE e OSO são as direcções predominantes no verão e no inverno, respectivamente. Nas manhãs, nas tardes e nas noites são predominantes os ventos de OSO, ESE e E, respectivamente;
- b) A distribuição das frequências da velocidade do vento na zona costeira de Vilankulo indica que velocidades compreendidas entre 4,0 e 4,5m/s são as mais frequentes e que a probabilidade de ocorrer ventos acima de 3m/s é de 75,90%. A densidade de potência energética mensal varia de 93 a 351W/m<sup>2</sup> com a consequente energia estimada variando de 35 a 130kWh e a energia anual estimada é 860kWh, valores bons para implementação de turbinas eólicas de pequeno porte para geração de electricidade. A potência hidráulica para a bombagem de água a uma altura de elevação de 25m varia de 37 a 166W e a consequente vazão estimada varia de 545 a 2433l/h, vazão muito boa para a bombagem de água para finalidade doméstica e até agrícola.
- c) A velocidade do vento na costa de Vilankulo aumenta com o aumento da altura variando de 4,53-7,38m/s, 5,30-8,62m/s e 6,06-9,85m/s para alturas de 25, 50 e 100m, respectivamente.

## 5.2 Sugestões

Para a implementação de tecnologias eólicas é importante avaliar com maior precisão o recurso eólico. Portanto, com base nos resultados desta pesquisa, sugere-se que:

- a) Seja feito o registo contínuo (durante o dia inteiro) de dados na estação meteorológica de Vilankulo, contrariamente ao actual período de medição (das 5:00 às 21:00), para garantir a alta qualidade dos mesmos;
- b) Se faça a instalação de estações de medição dos parâmetros do vento noutros locais do país, com recurso a torres mais altas, pois, em geral, o potencial eólico a esses níveis é mais promissor, mas dados a esses mesmos níveis têm sido mais escassos, pelo menos em Moçambique.
- c) Mais pesquisas sejam feitas para a análise económica da implementação de tecnologias eólicas em Vilankulo ou noutros locais cujo potencial é conhecido, de modo a aferir o seu real impacto; e
- d) O Governo moçambicano e/ou organizações privadas envidem esforços para investir no plano de implementação de turbinas eólicas de pequeno porte para a geração de energia eléctrica e de moinhos de vento para o bombeamento de água para fins domésticos e de irrigação na costa de Vilankulo dado ao seu potencial eólico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bailey, B.H., McDonald, S.L., Bernadett, D.W., Markus, M.J., Elsholz, K.V., 1997. *Wind Resource Assessment Handbook*, AWS Scientific Inc., New York.
- Castro, Rui, *Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltáica e Mini-hídrica*, 2ª edição, IST Press, Lisboa, 2012
- Chambela, Lourenço Simião, (1999): *Economia e Meio Ambiente: O Caso da Degradação Florestal do Distrito de Vilankulo (1992-1998)*, Dissertação de Licenciatura em Geografia. Universidade Eduardo Mondlane, 115p.
- Cnpat Embrapa: *Energia Eólica*. Cnpat Embrapa. Disponível em [www.cnpat.embrapa.br](http://www.cnpat.embrapa.br), acessado em 2014.02.12 às 19:21min
- Costa, Marcela F. X., *Estudo da Influência do Ângulo das Pás de um Aerogerador na Geração de Energia*, 2008. Disponível em [www.fcmc.es.gov.br](http://www.fcmc.es.gov.br), acessado em 2015.19.03, às 21:05min
- Cuamba et al., *Identification of Areas With Likely Good Wind Regimes for Energy Applications in Mozambique*, Maputo, 2011. Disponível em [www.ontario-sea.org](http://www.ontario-sea.org), acessado em 2015.02.03 às 18:46min
- Cuinica, André S., Kimambo, Cuthbert Z. M., Cuamba, Boaventura C., (2014): *Wind Energy Resource Assessment Along the Coast of Maputo Region in Mozambique*, Dissertação de Mestrado em Renewable Energy. Universidade de Dar es Salaam, 129p.
- Evance: *5kW Wind Turbine*. Evance, 2011. Disponível em [www.evancewind.com](http://www.evancewind.com), acessado em 2015.06.03 às 15:01min
- García, Felipe. H., (2004): *Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-fotovoltaicos*, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade do Rio Grande de Sul, Porto Alegre, 209p. Disponível em [www.ufpa.br/gedae/images/Art.Gedae/63.pdf](http://www.ufpa.br/gedae/images/Art.Gedae/63.pdf), acessado em 2014.08.03 às 11:47min
- Gautschi, Walter, *A Computacional Procedure for Incomplete Gamma Functions*. Purdue University, Darmstadt, 2009

- Hammar, Linus, *Wind and Solar Energy Resources in Tanzania and Mozambique*, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2011. Disponível em [www.mail.energypedia.info](http://www.mail.energypedia.info), acessado em 2015.02.03 às 19:03min
- IEA - International Energy Agency, *World Energy Outlook 2012*. IEA. 2012. Disponível em [www.iea.org](http://www.iea.org), acessado em 2014.15.09 às 08:40 min
- Jonathan, Michael, *Wind Energy*, 2010. Disponível em [www.istc.illinois.edu/main\\_sections/tech\\_assist/wind-energy.pdf](http://www.istc.illinois.edu/main_sections/tech_assist/wind-energy.pdf), acessado em 2015.17.02 às 08:50min
- MAE - MINISTÉRIO DE ADMINISTRAÇÃO ESTATAL, *Perfil do Distrito de Vilankulo, Província de Inhambane*. MAE. 2005.
- Mahumane, G., Mulder, P. e Nadaud, D. (2012): *Energy Outlook for Mozambique 2012-2030 LEAP-based Scenarios for Energy Demand and Power Generation*. In: III Conferência Internacional do IESE, Conference Paper nº 16.
- Marconi, M. A., Lakatos, E. M., *Metodologia Científica*, 6ª edição, Editora atlas S.A., São Paulo, 2011
- Marques, Jeferson, (2004): *Turbinas Eólicas: Modelo, Análise e Controle do Gerador de Indução com Dupla Alimentação*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 158p. Disponível em [www.ufsm.com.br](http://www.ufsm.com.br) acessado em 2014.18.12 às 18:35
- ME - MINISTÉRIO DE ENERGIA, *Distribuição da Rede Elétrica Nacional*. ME. Maputo, 2006
- Mendes, Carla L. T., Gomes, Abílio S., *Circulação nos Oceanos, Correntes Oceânicas e Massas D'água*, 2007. Disponível em [www.uff.br/ecosed/Correntes.pdf](http://www.uff.br/ecosed/Correntes.pdf), acessado em 2015.03.01 às 14:38min
- MME - Ministério de Minas e Energia, *Energia no Mundo*. MME. 2012. Disponível em [www.eletronuclear.gov.br](http://www.eletronuclear.gov.br), acessado em 2014.19.12 às 16:39min
- Müller, A., *Meteorologische Instrumente KG R. Fuess*, 2011. Disponível em [www.rfuess-mueller.de](http://www.rfuess-mueller.de), acessado em 2015.17.02 às 17:40min

- Nakata, Hirome & Coelho, Marcos A., *Geografia Geral*, 1ª edição, Editora Moderna, Rio de Janeiro, 1979
- NASA - National Aeronautics and Space Administration, *Atmospheric Science Data Center*, NASA. 2009. Disponível em [www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/](http://www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/), acessado em 2015.06.03 às 14:30min
- Proclira, *Circulação Geral da Atmosfera. Circulação Média à Superfície. Circulações Locais*. Proclira. 2007. Disponível em [www.proclira.uevora.pt](http://www.proclira.uevora.pt), acessado em 2015.02.01 às 12:29min
- Resende, Fernanda O., *Evolução Tecnológica dos Sistemas de Conversão de Energia Eólica para Ligação à Rede*, Porto, 2010
- Ricardo, Abdul, *Climatologia II*, Rio de Janeiro, 2004
- Rújula, Á., et al., *Guía de las Energías Renovables Aplicadas a las Pymes*, 2012. Disponível em [www.conectapyme.com/files/publica/Guia\\_E\\_Renovables.pdf](http://www.conectapyme.com/files/publica/Guia_E_Renovables.pdf), acessado em 2015.22.01 às 12:32
- Santos, A. A., et al., *Geração de Energia Eólica*, 2006. Disponível em [www.cursos.unisantabr/mecanica/polari/energiaeolica-tcc.pdf](http://www.cursos.unisantabr/mecanica/polari/energiaeolica-tcc.pdf), acessado em 2015.03.01 às 14:20min
- Silva, C. D., Seraphim, O. J., Teixeira, N. M., *Potencial Eólico para Bombeamento de Água na Fazenda Lageado*. Canais do Encontro de Energia no Meio Rural, 2003
- Silva, Varejão, *Meteorologia – Climatologia*, Versão Digital, Recife, 2005
- Zucule, Jonas Nombora, (2011): *An Avaliation of Wind Energy Potential for Power Generation in Mozambique*, Tese de Mestrado, University of KwaZulu-Natal, Durban

## APÊNDICES

### Apêndice A: Distribuição dos obstáculos em torno do ponto de medição dos dados



Figura A. 1: Distribuição dos obstáculos em torno do ponto de medição dos dados (Fonte: Google Earth)

### Apêndice B: Distribuição das frequências da direcção do vento ao longo do dia

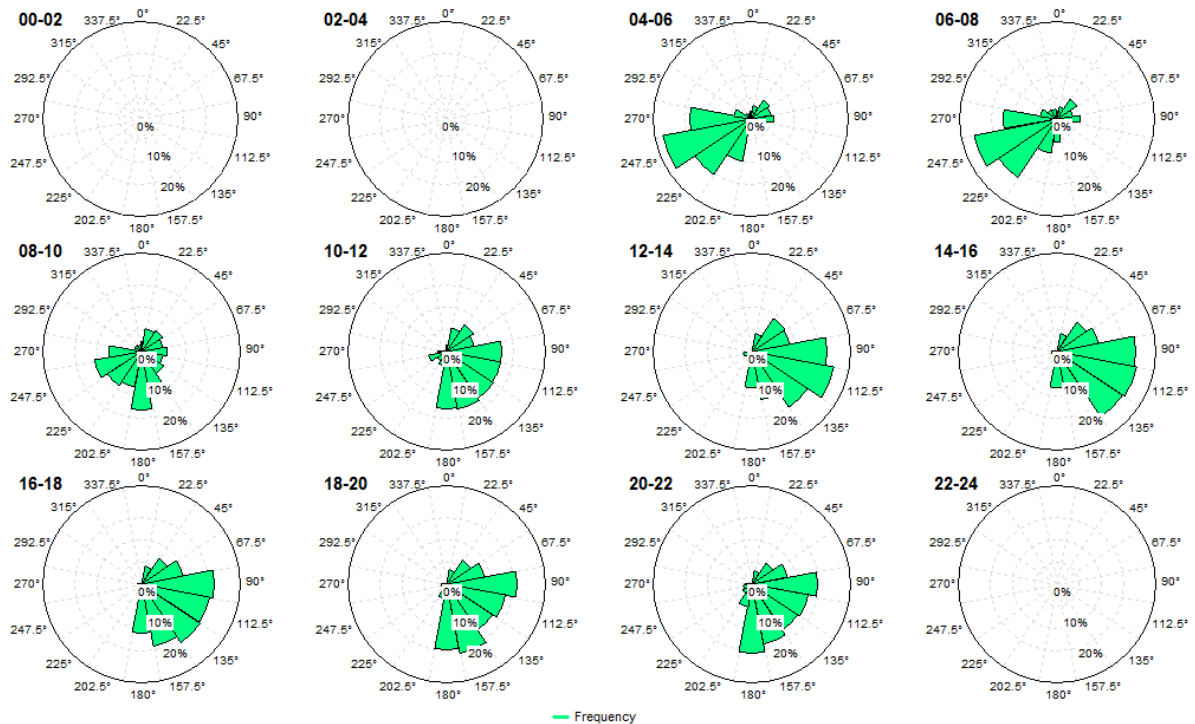


Figura A. 2: Rosas-dos-ventos da distribuição das frequências da direcção do vento durante o dia em Vilankulo



## ANEXO

**Anexo A: Especificações técnicas da turbina Evance R9000****Tabela A. 1:** Dados operacionais da Evance R9000 (Fonte: Evance, 2011)

<b>Dados Operacionais da Turbina Evance R9000</b>	
Arquitectura	Upwind, rotor com 3 pás, regulação automática
Potência Nominal	5kW contínua de 12 a 60m/s
Produção Anual de Energia	8.780kWh (Rendimento anual com velocidade média do vento de 5m/s)
Velocidade de <i>cut-in</i>	3m/s
Velocidade de <i>cut-out</i>	Nenhuma. Geração contínua até à velocidade de sobrevivência
Velocidade máxima de sobrevivência	60m/s
Classe IEC	Classe II, de acordo com a IEC 61400
Sistema de Controlo	Pás de posicionamento reactivo (Reactive™ Pitch Control)
Diâmetro do Rotor	5,5m
Velocidade Nominal do Rotor	200rpm
Tipo de Pás	Perfil aerodinâmico, totalmente otimizado, garantindo o máximo rendimento e o mínimo ruído
Material das Pás	Fibra de vidro reforçada, baixa reflexão, revestimento UV e anti-erosão
Gerador	De magnetos permanentes de elevada eficiência, sem escovas, ligação directa
Travões de Emergência	Automáticos, ElectroBrake™, patenteados (com controle manual para manutenção). Sem peças móveis
Posicionamento	Leme e rotor passivos
Altura da Torre	10m, 12m e 18m
Tipos de Torre	Auto-sustentáveis, elevação hidráulica ou guincho
Tempo de Vida Útil	Mínimo 20 anos
Massa Total	325kg excluindo a torre
Ruído	53dB à distância de 25m e vento a 8m/s 45.5dB à distância de 60m e vento a 8m/s
Temperatura de Funcionamento	-20°C a +50°C